

Untersuchung abbaubestimmender Faktoren zur Vorhersage der Gebrauchsdauer feuchtebeanspruchter Holzbauteile

DISSERTATION

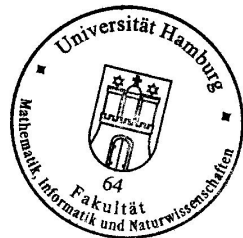
zur Erlangung des Doktorgrades
im Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Christian Brischke
aus Rotenburg/Wümme

Hamburg 2007

Genehmigt vom Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
an der Universität Hamburg
auf Antrag von Professor Dr. O. SCHMIDT
Weiterer Gutachter der Dissertation:
Herr Professor Dr. F. POHLEVEN
Tag der Disputation: 07. Dezember 2007

Hamburg, den 23. November 2007



A handwritten signature in black ink, appearing to read 'R. Lieberei'.

Professor Dr. Reinhard Lieberei
Leiter des Departments Biologie

Meiner lieben Steffi, meinem Sohn Falk und meinen Eltern

DANK

Die vorliegende Arbeit entstand in der Abteilung Holzbiologie am Zentrum Holzwirtschaft der Universität Hamburg und am Institut für Holzbiologie und Holzschutz der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH) in Hamburg-Lohbrügge.

Herrn **Prof. Dr. Andreas Rapp** danke ich für die hervorragende fachliche Betreuung der Arbeit, eine Vielzahl an konstruktiven Diskussionen und nicht zuletzt für den einen oder anderen "philosophischen Disput". Herrn **Prof. Dr. Olaf Schmidt** gilt mein besonderer Dank für die Anleitung meiner Arbeit. Für die Übernahme des Koreferats danke ich Herrn **Prof. Dr. Franc Pohleven**.

Ein besonders großer Dank geht an meinen Mitstreiter **Christian Welzbacher**, der mit seiner unerschütterlichen positiven Ausstrahlung immer wieder Motivation und eine große Hilfe war.

Für viele anregende Diskussionen danke ich **Dr. Hans Leithoff**, **Dr. Rolf Bayerbach** und **Dr. Rolf-Dieter Peek**, für die kritische Durchsicht dieser Arbeit **Dr. Eckhard Melcher**. Für die Unterstützung bei experimentellen Arbeiten und das stets ausgesprochen herzliche Arbeitsklima danke ich meinen Kollegen an der BFH, insbesondere **Karin Brandt**, **Andrea Niemeyer**, **Kathrin Behrmann**, **Marie Lenz** und **Jeong-Wook Seo**.

Für die freundliche Zusammenarbeit und Unterstützung bei Freilandexperimenten gilt mein Dank allen beteiligten Mitarbeitern der Gärtnerei der BFH, des Deutschen Wetterdienstes, der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) Baden-Württemberg in Freiburg, der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg in Stuttgart, des Wasser- und Schifffahrtsamtes Nürnberg sowie der Firma Menz-Holz in Reulbach.

*I am very grateful for all the support I got with the "32 sites" from my colleagues abroad, which are: **Dr. Luisa Borges**, **Dr. Simon Cragg** & **Prof. Dr. Rod Eaton** from Portsmouth, **Dr. Dennis Jones** & **Dr. Ed Suttie** from Garston, **Dr. David Dickinson**, **Dr. Derek Wallace** & **Dr. Michael Ray** from London, **Prof. Dr. Joris van Acker** from Ghent, **Isabelle Le Bayon** from Bordeaux, **Dr. Radovan Despot** & **Marin Hasan** from Zagreb, **Fred Evans** from Oslo, **Dr. Miha Humar**, **Matjaž Pavlič**, **Prof. Dr. Marko Petrič** & **Prof. Dr. Franc Pohleven** from Ljubljana, **Dr. Ulrika Råberg** & **Prof. Dr. Thomas Nilsson** from Uppsala, and **Dr. Barbara Illman** from Madison – Thanks to all of you!*

INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG	14
2	EINLEITUNG	18
2.1	Vorhersage der Gebrauchsdauer – Bedeutung und Hintergrund ...18	
2.2	Abbaufaktoren	21
2.2.1	Materialqualität.....	22
2.2.1.1	Natürliche Resistenz gegen holzerstörende Organismen	22
2.2.1.2	Technisch verbesserte Resistenz gegen holzerstörende Organismen	25
2.2.2	Konstruktionsniveau.....	27
2.2.3	Ausführungsqualität	28
2.2.4	Umgebungsbedingungen im Innen- und Außenbereich.....	28
2.2.5	Biotische Einflüsse.....	30
2.2.5.1	Pilze und Bakterien.....	30
2.2.5.2	Auftreten bestimmter Gruppen holzerstörender Organismen...31	
2.2.5.3	Nährstoffe	32
2.2.5.4	pH-Wert	32
2.2.5.5	Holzfeuchte.....	33
2.2.5.6	Holztemperatur	34
2.2.5.7	Klimabedingungen	35
2.2.6	Gebrauchsbedingungen.....	35
2.2.7	Pflege- und Wartungsniveau.....	36
2.3	Ansätze für Vorhersagemodelle	36
2.3.1	Zusammenhang zwischen Gebrauchsklassen und Dauerhaftigkeitsklassen.....	36
2.3.2	Klima-basierte Indizes.....	38
2.3.3	Faktormethode.....	40
2.3.4	Abbaumodelle	42
2.4	Ziele der Arbeit	43
3	MATERIAL UND METHODEN	46
3.1	Automatisierte Holzfeuchte- und Holztemperaturmessung	46
3.2	Doppellagen-Versuche an verschiedenen Standorten	50
3.2.1	Exposition der Prüfkörper	50
3.2.2	Charakterisierung der Standorte	52

3.2.3	Erfassung von Holzfeuchte und Holztemperatur	55
3.3	Erfassung von Klimadaten und Berechnung des Scheffer Climate Index.....	55
3.4	Eingrabeversuch mit verschiedenen Bodensubstraten und Modifikationen des Holz-Boden-Kontaktes	56
3.5	Molekularbiologische Identifizierung von Pilzen	58
3.6	Holzfeuchteüberwachung (Monitoring) an Bauwerken	61
3.6.1	Holzfassade mit verschiedenen Dachüberständen in Taastrup, Dänemark.....	61
3.6.2	Freitragende Holzbrücke in Essing, Bayern	63
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	65
4.1	Konzeption eines Modells zur Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holzbauteilen	65
4.2	Methoden zur Quantifizierung der direkten Abbaufaktoren Holzfeuchte und Holztemperatur.....	67
4.3	Einfluss ausgewählter Abbaufaktoren.....	72
4.3.1	Standort und Verzögerungszeit.....	72
4.3.2	Makroklima	77
4.3.3	Mikroklima	78
4.3.4	Materialklima	82
4.3.5	Dachüberstand	85
4.3.6	Bodensubstrat	88
4.3.7	Art, Fäuletyp und Sukzessionsstadium.....	92
4.4	Frühwarnsystem für Holzfeuchte-induzierte Befallsrisiken.....	96
4.5	Zusammenhang zwischen Gebrauchsdauervorhersage und Performance-basierter Klassifizierung von Holzprodukten	99
4.5.1	Rahmenbedingungen	99
4.5.2	Festlegung der notwendigen Anzahl von Referenz- Gebrauchsdauern.....	101
4.5.3	Bestimmung von Referenz-Gebrauchsdauern in Freilandprüfungen	104
4.5.4	Bestimmung von Referenz-Gebrauchsdauern in adaptierten Laborprüfungen	104
4.5.5	Performance-Faktoren.....	106
4.5.6	Performance-Klassen.....	107
4.5.7	Standortbeziehungen	107

5	FOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	110
5.1	Zusammenspiel von Gebrauchsdauervorhersage und Performance-basierter Klassifizierung.....	110
5.2	Ableitung grundlegender Annahmen zur Erstellung eines Vorhersagemodells	111
5.3	Langzeit-Messung der Holzfeuchte (Monitoring)	112
5.4	Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen.....	112
6	LITERATUR.....	114
7	PUBLIKATIONEN MIT REVIEW-VERFAHREN	137
7.1	Publikation I: REVIEW ARTICLE: Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products	139
7.1.1	Introduction	141
7.1.2	Influences on service life.....	142
7.1.3	Approaches for service life prediction	154
7.1.4	Concept for service life prediction	160
7.1.5	Conclusions	166
7.1.6	References	167
7.2	Publikation II: Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes.	181
7.2.1	Introduction	183
7.2.2	Materials and methods.....	184
7.2.3	Results and discussion – laboratory tests.....	189
7.2.4	Results and discussion – field tests	196
7.2.5	Conclusions	197
7.2.6	Acknowledgements.....	198
7.2.7	References	198
7.3	Publikation III: Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay: Results from in-situ measurements on buildings.....	201
7.3.1	Introduction	203
7.3.2	Materials and methods.....	204
7.3.3	Results and discussion	210

7.3.4	Conclusions.....	217
7.3.5	Acknowledgements	218
7.3.6	References.....	218
7.4	Publikation IV: Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field - Observations in different micro-climates	221
7.4.1	Introduction.....	223
7.4.2	Material and methods.....	223
7.4.3	Results and discussion.....	226
7.4.4	Conclusions.....	238
7.4.5	References.....	239
7.5	Publikation V: Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature, and fungal decay determined for 23 European field test sites.....	245
7.5.1	Introduction.....	246
7.5.2	Material and methods.....	247
7.5.3	Results and discussion.....	250
7.5.4	Conclusions.....	258
7.5.5	References.....	258
7.6	Publikation VI: External and internal fungal flora of pine sapwood (<i>Pinus sylvestris</i> L.) specimens in above-ground field tests at six different sites in south-west Germany	263
7.6.1	Introduction.....	265
7.6.2	Materials and methods	266
7.6.3	Results	270
7.6.4	Discussion.....	274
7.6.5	Acknowledgements	278
7.6.6	References.....	278
7.7	Publikation VII: The influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood and oak heartwood in ground contact.....	285
7.7.1	Introduction.....	287
7.7.2	Material and methods.....	288
7.7.3	Results and discussion.....	290
7.7.4	Conclusions.....	294
7.7.5	References.....	295
8	PUBLIKATIONEN OHNE REVIEW-VERFAHREN	299

8.1	Publikation VIII: A roadmap for performance-based specification of wooden components based on service life prediction	301
8.1.1	Introduction	302
8.1.2	Roadmap for the specification of wood and wood-based products	304
8.1.3	Conclusions	313
8.1.4	References	314
9	ANHANG	315

1 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es, sowohl konzeptionell als auch experimentell eine Grundlage für die Erstellung eines Modells zur Vorhersage der Gebrauchsdauer feuchtebeanspruchter Holzbauteile zu schaffen.

Das derzeit in Europa etablierte System aus normierten Methoden zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten ist nur sehr bedingt geeignet, die zu erwartende Gebrauchsdauer von Holz abzuschätzen und somit Holzprodukte hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit (Performance) zu charakterisieren und zu klassifizieren. Ein solches System, das darüber hinaus europaweit harmonisiert sein soll, wird aber von der Europäischen Bauproduktenrichtlinie (Construction Products Directive, 1988) verlangt. Es ist weiterhin unumgänglich, um der weltweit zunehmenden Implementierung von Performance-basierten Spezifikationen im Baubereich Rechnung zu tragen und somit die Konkurrenzfähigkeit des Werk- und Baustoffs Holz aufrecht zu erhalten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb zweierlei konzeptionelle Ansätze erarbeitet. Zum einen wurden nach Durchsicht der einschlägigen Literatur die wichtigsten den Angriff des Holzes durch holzerstörende Organismen beeinflussenden Faktoren ermittelt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Abschätzung der Gebrauchsdauer bewertet. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse über die verschiedenen Abbaufaktoren wurde ein Konzept für die Erstellung eines Vorhersagemodells entworfen und ausgewählte Einflussfaktoren quantitativ in Freilanduntersuchungen ermittelt. Zum anderen wurde ein Ansatz für die Zusammenführung bereits bestehender Elemente aus Normung und Prüfmethodik zu einem praktikablen und schon zum heutigen Zeitpunkt durchführbaren Klassifizierungssystem entwickelt.

Unter der Vielzahl von Faktoren, die entweder einen direkten oder indirekten Einfluss auf den Abbau des Holzes und somit die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen haben, wurden die Holzfeuchte und die Holztemperatur als Schlüsselfaktoren identifiziert. Um den Einfluss dieser beiden Größen zu quantifizieren, wurde ein Messsystem zur automatisierten Holzfeuchte- und

Holztemperaturmessung entwickelt. Miniatur-Datenaufzeichnungsgeräte (Datenlogger) wurden zur Messwertaufzeichnung verwendet. Während die Holztemperatur über handelsübliche Messfühler bestimmt wurde, war für die elektrische auf dem Widerstandsprinzip basierende Holzfeuchtemessung eine holzartspezifische und auf das Messsystem abgestimmte Kalibrierung notwendig. Um eine ausreichend stabile und dauerhafte Verbindung zwischen den Edelstahlelektroden und dem Holz sicherzustellen, wurden die Elektroden mit einem leitfähigen Epoxidklebstoff in das Holz eingeleimt. Das Messsystem erwies sich in Freilandversuchen an mehr als 30 verschiedenen Standorten über einen Zeitraum von mehr als sieben Jahren als zuverlässig und lieferte täglich Holzfeuchtwerte ohne erkennbare Fehlmessungen. Um den Einsatz des Systems auch an Bauwerken im Gebrauch, die darüber hinaus bereits teilweise von holzerstörenden Pilzen angegriffen waren, zu ermöglichen, war eine Modifikation der Messstellen in Form von Messdübeln notwendig. Diese mit einem Tebuconazol-haltigen Schutzmittel getränkten Kiefernspinddübel (*Pinus sylvestris* L.) wurden bereits im Labor mit Elektroden versehen und als Ganzes in die zu untersuchenden Bauteile eingepasst.

Langzeit-Holzfeuchtemessungen wurden an verschiedenen Objekten und in Freilandstudien durchgeführt: An der Fußgängerbrücke in Essing, die aufgrund mangelnder konstruktiver Schutzmaßnahmen bereits durch Brautfäule geschädigt war, ließen sich unterschiedlich hohe Feuchtebelastungen der verschiedenen Bauteile in Abhängigkeit von der Ausrichtung, der Einbauhöhe und der Nähe zu großflächigen Metall-Verbindungsmiteln, die die Wiederaustrocknung des Holzes behinderten, nachweisen. Weiterhin zeigte sich die Eignung kontinuierlicher Feuchtemessungen als Fäulnisfrühwarnsystem. Durch zu hohe Holzfeuchten induzierte Gefährdungen durch Pilzbefall ließen sich frühzeitig erkennen. An einer Fassade in Taastrup, Dänemark, wurde der Einfluss verschiedener Dachüberstände auf die Feuchtebedingungen in der Fassade ermittelt. Hier wurde aufgezeigt, dass sich der Einfluss indirekter Abbaufaktoren (z.B. Dachüberstand) auf bestimmte direkte Abbaufaktoren (z.B. Holzfeuchte) quantifizieren und somit in ein Vorhersagemodell integrieren lässt.

Der Schwerpunkt der experimentellen Arbeiten lag auf der Durchführung von Doppellagen-Tests an 27 verschiedenen Standorten in Europa. Neben der jährlich durchgeführten Abbaubewertung der Prüfkörper aus Kiefernspint- und Douglasienkernholz (*Pseudotsuga menziesii* Franco), wurde an allen Standorten täglich die Holzfeuchte und die Holztemperatur bestimmt. Ziel dieser Untersuchung war es, Dosis-Wirkungs-Funktionen zwischen den beiden direkten Abbaufaktoren und ihrer Wirkung in Form von pilzlichem Holzabbau zu ermitteln. Die Berechnung der Dosis als Kombination aus kombinierten Tageswerten beider Parameter erbrachte die engste Korrelation mit den zugehörigen Abbaubewertungen. Durch computergestützte Optimierung ließ sich über alle Versuchsstandorte hinweg eine sigmoide Korrelationsfunktion bestimmen. Ebenfalls an allen Versuchsstandorten täglich ermittelte Temperatur- und Niederschlagswerte erwiesen sich als ungeeignet für eine Korrelation in Form des Scheffer Climate Index mit dem Abbaufortschritt.

Die Untersuchung weiterer ausgewählter Einflussfaktoren ergab u.a., dass sich bei im Erdkontakt exponiertem Holz neben dem Einfluss des Standorts auch das vorliegende Bodensubstrat wesentlich auf die Gebrauchsdauer des Holzes im Freiland auswirken kann. Ein Zusammenhang zwischen verschiedenen in Freilandversuchen durch Terminalen-Restriktions-Fragment-Längen-Polymorphismus (T-RFLP) detektierten Pilzarten und der Befallsintensität ließ sich nicht nachweisen. Der Einfluss des dominierenden Fäuletyps (Sukzessionsstadiums) wurde hingegen aufgezeigt.

Es hat sich gezeigt, dass vielfältige Einflussfaktoren für die Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holz zu berücksichtigen sind, sich der Einfluss der zahlreichen indirekten Faktoren jedoch auf wenige direkte Faktoren reduzieren lässt. Es empfiehlt sich somit, für die Gebrauchsdauervorhersage einen offenen mehrstufigen Modellansatz zu wählen, der zunächst die wichtigsten direkten Faktoren, insbesondere die Schlüsselfaktoren Holzfeuchte und Holztemperatur, erfasst, in weiteren Stufen aber erweiterbar ist um den Einfluss indirekter Abbaufaktoren. Die auf Basis direkter Abbaufaktoren ermittelten Dosis-Wirkungsfunktionen stellen einen wichtigen Baustein für ein solches Vorhersagemodell dar und sollten in Zukunft für weitere Holzarten, Expositionen und holzerstörende Organismen verifiziert werden.

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass derzeit in Europa noch kein funktionierendes Vorhersagemodell existiert, wurde schließlich in Form eines Fahrplans (Roadmap) ein möglicher Ansatz zur Schaffung eines europaweiten Klassifizierungssystems für Holzprodukte erarbeitet, wobei bereits bestehende Prüfmethode(n) (nach ggf. notwendiger Adaption) eingesetzt werden sollten. Hierzu ist eine Einigung auf eine bestimmte Anzahl von Expositionskategorien notwendig, um das mangelnde Wissen über den Einfluss der verschiedenen Abbaufaktoren auszugleichen und somit eine ausreichend präzise Einschätzung der zu erwartenden Performance zu gewährleisten.

2 EINLEITUNG

2.1 Vorhersage der Gebrauchsdauer – Bedeutung und Hintergrund

Holz ist seit Jahrhunderten ein häufig verwendeter Roh-, Werk- und Baustoff. Vielfältige Einsatzmöglichkeiten im Innen- und Außenbereich sowie sein ökologischer Vorteil als nachwachsender Rohstoff verhelfen dem Holz auch heute noch zu einer herausragenden Stellung. Verschiedene Organismen sind in der Lage, Holz zu besiedeln und als Nahrungsquelle zu nutzen, woraus einerseits die biologische Abbaubarkeit des Holzes resultiert, andererseits aber die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen verringert wird. Verschiedene Maßnahmen sind geeignet, die Gebrauchsdauer von Holz zu erhöhen. Neben der Einbringung chemischer Schutzmittel und der Modifikation von Holz werden konstruktive Schutzmaßnahmen mit dem Ziel, Feuchteanreicherungen im Holz zu vermeiden, ergriffen. Die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen hängt somit von einer Vielzahl abbaubestimmender Faktoren ab, die sowohl vom Holz selbst (endogene Faktoren) als auch von den jeweiligen Umgebungsbedingungen (exogene Faktoren) ausgehen. Für die Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holzbauteilen ist es notwendig, die vielfältigen Einflussfaktoren in ihrer Wirkung qualitativ und quantitativ zu verstehen.

Eine verlässliche Gebrauchsdauervorhersage ist dringend erforderlich, weil sich aus der zu erwartenden Gebrauchsdauer auch die Leistungsfähigkeit (=Performance) eines Holzbauteils oder Holzprodukts ergibt. Ein einheitliches und harmonisiertes System für eine Performance-basierte (=leistungsbasierte) Klassifizierung und Spezifizierung von Holzprodukten existiert in Europa bislang nicht. Zugleich wird der Bedarf für ein solches System immer offensichtlicher, weil Anwender und Verbraucher von Holzprodukten ein zunehmendes Interesse an verlässlichen Informationen über die von einem Holzprodukt zu erwartende Performance entwickeln (Sexton und Barrett 2005, Lützkendorf und Speer 2005, Englund 2006). Da der Endverbraucher oft zugleich der Entscheidungsträger auf dem Markt ist, liegt es schließlich in seiner Hand, ob in Zukunft Holz- oder Substitutprodukte im Baubereich zur Anwendung kommen.

Die Notwendigkeit, europaweit ein harmonisiertes System für eine Performance-basierte Klassifizierung von Holzprodukten zu etablieren, ergibt sich weiterhin aus der europäischen Bauprodukten-Richtlinie (European Construction Products Directive, CPD, 1988). Im Anhang I der CPD werden essentielle Anforderungen an Bauprodukte, wie mechanische Widerstandsfähigkeit, Stabilität und Sicherheit während des Gebrauchs gefordert, wodurch auch die für Holz so wichtige Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Organismen eingeschlossen ist. In der CPD werden weiterhin Produkte, die "für den vorgesehenen Gebrauch tauglich" sind, gefordert und somit eine ausreichende Performance über die gewünschte Gebrauchsdauer aufweisen müssen.

Der Begriff Performance bezeichnet das qualitative Niveau einer kritischen Eigenschaft, die zum Erfüllen der geforderten Funktionsfähigkeit notwendig ist (ISO 15686-1, 2000). Unter der Gebrauchsdauer wird hingegen die Zeit verstanden, während der ein Gebäude oder dessen Teile die geforderte Performance erfüllen. Gebrauchsdauervorhersage (service life prediction SLP) und Performance-basierte Klassifizierung (performance classification PC) hängen somit unmittelbar zusammen und es gilt:

Gebrauchsdauervorhersage = Performance-Vorhersage

Aus der CPD ergeben sich somit drei wesentliche Aufgaben für die Holzindustrie, aber auch für die Holzwissenschaft, das Materialprüfungswesen und die Normung:

- 1) Bereitstellung von Daten, die für die Abschätzung der Performance von Holzprodukten geeignet sind
- 2) Entwicklung von Methoden, um die Performance von Holzprodukten zu bewerten
- 3) Etablierung eines europaweit harmonisierten und vereinheitlichten Systems zur Klassifizierung und Spezifizierung von Holzprodukten

Weltweit nehmen Performance-basierte Spezifikationen im Baubereich zu (u.a. Ang *et al.* 2005, Duncan 2005, Huovila 2005). Es werden nicht mehr bestimmte Materialien ausgeschrieben, sondern die erforderliche Performance unter bestimmten Gebrauchsbedingungen (u.a. Jernberg *et al.* 2004, Sjöström *et al.* 2005, Foliente *et al.* 2005). Auch die Holzbranche muss ihren Beitrag in Form von kompatiblen Performance-Daten leisten. Werden die oben genannten Aufgaben von der Holzbranche nicht erfüllt, steht zu befürchten, dass Holz in Zukunft für Performance-basierte Ausschreibungen nicht mehr zur Wahl steht, oder aber andere "holzfremde" Gruppen, dem Werk- und Baustoff Holz Performance-Daten zuweisen (Hovde und Moser 2004, Hovde 2005, ISO 15686-8, 2007).

Den Begriffen "Dauerhaftigkeit" und "Gebrauchsdauer" werden teilweise sehr unterschiedliche Bedeutungen zugemessen, was zu grundsätzlichen Missverständnissen führt: Vielfach wird die Dauerhaftigkeit eines Materials (Produkts) als Materialeigenschaft verstanden, was der Definition nach EN 350-1 (1994) und EN 1001-2 (2005) als "Widerstandsfähigkeit von Holz gegen eine Zerstörung durch holzerstörende Organismen" entspricht. Im Gegensatz hierzu definiert die internationale Norm ISO 15686-1 (2000) Dauerhaftigkeit nicht als Materialeigenschaft, sondern als "die Fähigkeit eines Gebäudes oder seiner Teile, eine geforderte Funktion über eine bestimmte Zeitspanne unter dem Einfluss von während des Gebrauchs zu erwartenden Agenzien zu erfüllen". Um Missverständnissen vorzubeugen, werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Definitionen zugrunde gelegt: Die Dauerhaftigkeit des Holzes ist seine Widerstandsfähigkeit gegenüber holzerstörenden Organismen unter den jeweiligen Umgebungseinflüssen. Die Widerstandsfähigkeit gegen Holzerstörer selbst ist eine material-inhärente Eigenschaft und gleichzusetzen mit der Materialqualität (ISO 15686-1, 2000). Der Begriff "natürliche Dauerhaftigkeit" soll nur für unbehandeltes Holz verwendet werden, während im Fall von einer, z.B. durch Einbringen chemischer Schutzmittel verbesserten Dauerhaftigkeit der Begriff "technisch verbesserte Dauerhaftigkeit" anzuwenden ist. Die Dauerhaftigkeit ist somit eine Eigenschaft, die abhängig von den Umgebungsbedingungen ist und zu einer bestimmten Gebrauchsdauer führt.

Für die Bestimmung der Gebrauchsdauer eines Holzbauteils ist es nicht allein ausreichend, die Resistenz des jeweiligen Materials zu ermitteln, sondern auch den Einfluss einer Vielzahl von Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Dass dieser Umstand in Industrie und Forschung bislang nur ungenügend berücksichtigt wird, zeigen Befragungsergebnisse von Brischke und Englund (2005) und Sjöström *et al.* (2005). Der Fokus bei Dauerhaftigkeitsuntersuchungen liegt demnach weitgehend auf standardisierten Prüfverfahren, die in den meisten Fällen für die Prüfung von Schutzmitteln entwickelt wurden und somit nur beschränkt auf zu erwartende Gebrauchsdauern von natürlich dauerhaftem, modifiziertem oder chemisch geschütztem Holz schließen lassen (Hertel 2005, Viitanen und Ross Gobakken 2005).

Auf den Umstand, dass Holz nicht nur eine Dauerhaftigkeit aufweist, sondern in Abhängigkeit von der jeweiligen Exposition (Gebrauchsklasse, *cf.* Kapitel 2.3.1) unterschiedliche Dauerhaftigkeiten zeigt, haben bereits verschiedene Autoren hingewiesen (u.a. Van Acker *et al.* 2003, Augusta 2007). Die systematische Erarbeitung von Prüfmethoden, die zum einen verschiedene Umgebungsbedingungen repräsentieren, und sich zum anderen für die Klassifizierung von Holzprodukten eignen, findet im Holzsektor aber erst seit wenigen Jahren statt (Leicester *et al.* 1997, Morris 2005, Greaves 2006, Englund 2006).

2.2 Abbaufaktoren

Als Grundlage für die Erstellung eines Konzepts zur Gebrauchsdauervorhersage von Holzbauteilen wird ein Überblick der wichtigsten Faktoren, die einen potentiellen Einfluss auf die Gebrauchsdauer von Holz haben, gegeben (*cf.* Publikation I, 7.1). Der Fokus der Ausführungen liegt dabei auf dem Abbau des Holzes durch holzerstörende Pilze und Bakterien.

2.2.1 Materialqualität

2.2.1.1 Natürliche Resistenz gegen holzerstörende Organismen

Die Resistenz des Holzes gegenüber holzerstörenden Organismen wird durch eine Vielzahl von Subfaktoren, die im Folgenden beschrieben werden, bestimmt.

Das Kernholz vieler Holzarten enthält extrahierbare Verbindungen (im Folgenden: Extraktstoffe), die die Dauerhaftigkeit gegenüber Pilzen, Insekten und Mikroorganismen erhöhen (Fengel und Wegener 1989). Beispielsweise ließ sich eine große Anzahl verschiedener Chinone aus dem sehr dauerhaften Kernholz von Teak (*Tectona grandis* L.) extrahieren (Simatupang 1964). Splintholz und wenig dauerhafte Hölzer verfügen in der Regel nur über wenige Extraktstoffe. Extraktstoffe können biozid oder hemmend wirken oder die Feuchtwechselzeiten des Holzes beeinflussen (z.B. Harze, Gummen, Lignane, Gérardin *et al.* 2004, Stirling und Morris 2006). Beide Effekte sind vermutlich in sehr dauerhaften Holzarten vereint (Schultz und Nicholas 2000). Mehr als 10000 verschiedene Verbindungen sind als Extraktstoffe von Pflanzen beschrieben (Duchesne *et al.* 1992). Aufgrund dieser großen Bandbreite lässt sich der Einfluss bestimmter Extraktstoffe nur schwer quantifizieren und der Einfluss aller in einer Holzart vorhandenen Extraktstoffe muss in seiner Gesamtheit betrachtet werden.

Aus einer Vielzahl von Untersuchungen ist bekannt, dass der Extraktstoffgehalt von der Position im Stamm abhängt, wobei die Resistenz des Kernholzes von innen nach außen mit einem Maximum an der Kernholzperipherie zunimmt (Cartwright 1941, Scheffer und Hopp 1949, Gardener und Barton 1958, Piirto und Wilcox 1981, Hillis 1987, Haupt *et al.* 2003). Signifikante Unterschiede in der Resistenz gegen holzerstörende Pilze zwischen juvenilem und adultem Holz fanden sich z.B. bei Robinie (*Robinia pseudoacacia* L., Richter 2000) und Teak (Leithoff *et al.* 2001). Ähnliche Beobachtungen wurden von Willeitner (1982) beschrieben, der eine geringere Resistenz in der Intermediärzone zwischen Kern- und Splintholz von Bongossi (*Lophira alata* Baenks ex Gaertn. f.) fand. Über die Stammachse nimmt die Resistenz von unten nach oben ab (Scheffer 1957), wobei der Einfluss der Lage im Querschnitt stärker als der Einfluss der Stammhöhe ist.

Reaktionsholz weist eine morphologisch und chemisch von normalem Holz abweichende Charakteristik auf, was eine ebenfalls abweichende Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen vermuten lässt. Das Druckholz der Gymnospermen erwies sich als dauerhafter gegenüber Braun- und Weißfäuleerregern (Timell 1986, Blanchette *et al.* 1994). Schmidt (1980) und Zabel und Morrell (1992) berichten hingegen von einer höheren Anfälligkeit des Zugholzes von Laubhölzern gegenüber Angriff durch Bakterien bzw. Pilze, während Blanchette *et al.* (1994) ähnlich hohe Abbauraten durch Pilzangriff ermittelten. Somit scheint für praktische Anwendungen der Einfluss von Reaktionsholz auf die natürliche Resistenz eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Neben Unterschieden innerhalb eines Baumes, kann auch die Herkunft des Materials einen Einfluss auf die natürliche Resistenz haben. So ist Redwood [*Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.] von Naturstandorten ("old growth") resistenter gegenüber Pilzbefall als Holz aus anthropogenen Forstkulturen ("second growth", Clark und Scheffer 1983). Entsprechende Ergebnisse liegen auch für andere Holzarten vor (Scheffer 1943, Campbell und Clark 1960). Australisches Turpentineholz [*Syncarpia glomulifera* (Sm.) Nied.] erwies sich bei Herkünften außerhalb seines natürlichen Verbreitungsgebietes als nicht bohrmuschelfest, wie Amos und Dadswell (1948) am Beispiel von kieselsäurearmem Plantagenholz aus Hawaii zeigten. Untersuchungen an Lärchenkernholz (*Larix* spp.) ergaben hingegen keinen nennenswerten Einfluss auf die Resistenz im Erdkontakt (Rapp *et al.* 2002) sowie gegen Basidiomyceten im Laborversuch (Viitanen *et al.* 1997). Es scheint somit keine allgemeingültige Abhängigkeit zwischen Provenienz und Resistenz gegenüber Holzerstörern für alle Holzarten zu geben.

Ein möglicher Einfluss des Fällzeitpunkts in Kombination mit der Mondphase auf die Resistenz gegenüber holzerstörenden Organismen sowie weiteren Eigenschaften des Holzes wird bereits seit vielen Jahren diskutiert (Ważny und Krajewski 1984, Clausnitzer 1990, Bues und Triebel 2000, Teischinger und Fellner 2000, Zürcher 2000). In Laborprüfungen wies wintergefälltes Kiefernholz zwar eine geringfügig höhere Resistenz gegen verschiedene Basidiomyceten als sommergefälltes Holz auf (Ważny und Krajewski 1984), ein signifikanter

Einfluss der Mondphase ließ sich aber nicht feststellen. Boutelje *et al.* (1986) fanden hingegen keine Unterschiede in der Resistenz von winter- und sommergefällter Kiefer und Fichte. Es muss somit streng zwischen dem Fällzeitpunkt und den in der jeweiligen Jahreszeit vorherrschenden Lagerungsbedingungen unterschieden werden. Eine geringere Pilzaktivität im Winter beeinflusst die Dauerhaftigkeit des Holzes positiv, ist aber nicht als Komponente der materialeigenen Resistenz des Holzes zu sehen.

Lagerung, Trocknung und Dämpfung des Holzes sind im weitesten Sinne als Behandlungen des Holzes zu bezeichnen, werden aber in der Regel nicht durchgeführt, um die Resistenz des Holzes zu verbessern. Andererseits ist durch eine solche Behandlung eine Änderung der Resistenz möglich. Eine 20jährige Lagerung von Iroko [*Chlorophora excelsa* (Welw.) Benth.] bei Raumtemperatur führte zum Verlust seiner Termitenresistenz (Bavendamm 1974). Untersuchungen von Terziev und Nilsson (1999) an kammergetrocknetem Kiefernholz zeigten einen um das Doppelte erhöhten Masseverlust durch Moderfäulepilze im Erdkontakt in einer 2 mm dicken oberflächlichen Holzschicht, die durch die Trocknung reich an Nährstoffen war, im Vergleich zu darunter liegenden Schichten. Das Dämpfen von Robinie führte ebenfalls zu einer verringerten Resistenz des Holzes (Richter 2000).

Holzarten mit hoher Dichte besitzen nicht notwendigerweise eine erhöhte Resistenz gegenüber holzerstörenden Organismen. Schwere Holzarten, wie Buche (*Fagus sylvatica* L.), Buchsbaum (*Buxus sempervirens* L.) oder Zapatero [*Gossypium praecox* (Griseb.) P. Wilson], weisen nur eine geringe Dauerhaftigkeit auf (Willeitner 1984). Ebenso fanden Edlund (1998), Yu *et al.* (2003), Guilley *et al.* (2004) und Rydell *et al.* (2005) keine Korrelation zwischen Dichte und Resistenz innerhalb einer Holzart.

Bei der Beschreibung des Dichteinflusses auf die Resistenz des Holzes gegenüber Holzzerstörern müssen zwei Sichtweisen unterschieden werden. In Pilzresistenz-Prüfungen wird üblicherweise der durch Pilzaktivität verursachte Masseverlust berechnet, der sich sowohl absolut in Gramm oder prozentual ausdrücken lässt (Nilsson und Daniel 1992). Der absolute Masseverlust ist hierbei ein Maß für die Aktivität des Prüfpilzes (metabolisierte Holzsubstanz) und der prozentuale Masseverlust ein Maß für die verbleibende Masse des

Holzes, bzw. die Restfestigkeit des Holzes. Beim Vergleich der Resistenz von Hölzern unterschiedlicher Dichte sollte deshalb stets der absolute Masseverlust herangezogen werden. Welzbacher (2001) fand keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des absoluten Masseverlustes durch *Trametes versicolor* (L.:Fr.) Pilát zwischen unverdichteter ($0,41 \text{ g cm}^{-1}$) und verdichteter Fichte ($1,20 \text{ g cm}^{-1}$), aber höhere Masseverluste ergaben sich für verdichtete Fichte durch *Coniophora puteana* (Schum.:Fr.) P. Karsten und *Oligoporus placenta* (Fr.) Gilb. & Ryv. im Vergleich zu unverdichteten Kontrollen (Welzbacher *et al.* 2004). Ergebnisse von Schwarze und Spycher (2005) für drei Braunfäuleerreger unterstützen diese Beobachtungen. Eine künstlich erhöhte Dichte führt somit nicht zu einer Erhöhung der Resistenz, obwohl das Pilzwachstum durch die Verringerung von Porenräumen erschwert wird, aber auch die Zugänglichkeit des Holzes für Pilze durch die Entstehung von Mikrorissen und Mikrokapillaren nach einer Wiederbefeuchtung erhöht wird (Adachi *et al.* 2004).

Thyllen reduzieren die Permeabilität und Zugänglichkeit des Holzes, so dass die Feuchtaufnahme verringert wird. Obwohl einige sehr dauerhafte Holzarten, z.B. Robinie, Thyllen bilden, führt die Thyllenbildung nicht notwendigerweise zu einer erhöhten Resistenz, wie bei dem fakultativen Farbkernbildner Buche (Hösli und Osusky 1978, Bauch 1980).

2.2.1.2 Technisch verbesserte

Resistenz gegen holzerstörende Organismen

Die Resistenz des Holzes lässt sich durch viele verschiedene Techniken erhöhen, so dass sie nicht mehr einzig auf den natürlichen Holzeigenschaften beruht. Der chemische Holzschutz zielt darauf ab, den Angriff durch holzerstörende Organismen zu unterbinden. Hierzu werden üblicherweise biozide oder hemmende Substanzen in das Holz eingebracht. Eine Verbesserung bis hin zu einem "sehr dauerhaften" Holz (EN 350-1, 1994), gleichbedeutend mit einer Verlängerung der Gebrauchsdauer um mindestens den Faktor fünf im Vergleich zu nicht dauerhaftem Holz, ist möglich, vorausgesetzt, dass das verwendete Schutzmittel auf den angreifenden Organismus abgestimmt ist, eine ausreichende Schutzmittelaufnahme erzielt wird und die Wirkstoffe ausreichend in das Holz eindringen, verteilt und fixiert

werden. Greaves (1977) berichtete über die Bedeutung einer gleichmäßigen Eindringung und Mikroverteilung auf Zellwandebene für einen effektiven chemischen Holzschutz. Seine Untersuchungen an Telegrafmasten in Australien, die mit einem Kupfer-Chrom-Arsen-haltigen Holzschutzmittel imprägniert waren, zeigten, dass eine mangelhafte Schutzmittelverteilung zum vorzeitigen Versagen führen kann, obwohl eine adäquate Aufnahme und Fixierung des Schutzmittels erzielt wurden. So fanden sich Moderfäulekavernen in den Zellwänden, obwohl die Tertiärwände durch eine Schicht aus Wirkstoffen bedeckt waren, die Sekundärwände aber blieben wirkstofffrei. Ein weiterer Grund für vorzeitiges Bauteilversagen ist die Auswaschung von nicht ausreichend fixierten Wirkstoffen, was insbesondere bei Kontakt mit Erde oder Wasser auftritt (u.a. Greaves 1977, Wakeling und Singh 1993, Leicester *et al.* 2005, Wakeling 2006b).

Um den Einsatz von für den Menschen und seine Umwelt gefährlichen Substanzen zu verringern, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene biozidfreie Holzvergiftungsprozesse entwickelt und etabliert (u.a. Burmester 1970, Tjeerdsma *et al.* 1998, Sailer *et al.* 2000, Rapp *et al.* 2001, 2005, Kamdem *et al.* 2002, Welzbacher und Rapp 2003, Westin *et al.* 2004): Einige Hydrophobierungs- und Modifizierungsprozesse ermöglichen eine Verbesserung der Resistenz des Holzes um mindestens den Faktor fünf.

Beschichtungen reduzieren die Photodegradation des Holzes durch die Absorption von ultraviolettem Licht. Darüber hinaus wird die Wasseraufnahme des Holzes reduziert, wodurch ein Pilzangriff verhindert wird. Die Wirksamkeit von Anstrichen ist sehr unterschiedlich und hängt stark von den getroffenen Instandhaltungsmaßnahmen ab (Feist 1982). So wird nur durch opak-pigmentierte Beschichtungen UV-Strahlung effektiv absorbiert und nur durch ausreichend dicke Anstriche das Holz vor Feuchtigkeit geschützt (Kropf *et al.* 1994). Werden notwendige Pflegemaßnahmen nicht durchgeführt, wird die holzschützende Wirkung von Beschichtungen ins Gegenteil verkehrt: Bei Beschädigung einer Beschichtung dringt Wasser über Fehlstellen in das Holz ein, während eine Wiederaustrocknung durch die Beschichtung erschwert ist, so dass es im Holz zu einer Feuchteanreicherung kommt (Derbyshire und Carey 2001).

Die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Arten holzverfärbender und holzerstörender Pilze wurden für die Ausnutzung von synergistischen und antagonistischen Effekten im Bereich des biologischen Holzschutzes vielfach untersucht. Die Hemmung von Fäulepilzen durch den Schimmelpilz *Trichoderma* sp. wurde von verschiedenen Autoren nachgewiesen (Highley und Ricard 1988, Doi und Yamada 1992, Morris *et al.* 1992, Bürgel *et al.* 1994, Schoeman *et al.* 1994, Bruce 1998). Eine praktische Anwendung dieser biologischen Schutzmaßnahmen für verbautes Holz hat bislang nicht stattgefunden.

Zusammenfassend ergibt sich, dass die Resistenz des Holzes, als natürliche oder technisch verbesserte Materialeigenschaft, der am häufigsten und intensivsten untersuchte Einfluss auf die Gebrauchsdauer des Holzes ist. Aufgrund seiner Komplexität in Form einer Vielzahl von Subfaktoren und Wechselwirkungen mit Umwelteinflüssen, werden aber immer noch weitere und detailliertere Informationen zu verschiedenen Teilaspekten für eine verlässliche Gebrauchsdauervorhersage benötigt.

2.2.2 Konstruktionsniveau

Holzschutz lässt sich, abgesehen vom Einsatz chemischer Schutzmittel, am effektivsten durch konstruktive Maßnahmen erreichen. Die verschiedenen Konstruktionsdetails eines Bauwerks und seiner Teile beeinflussen die Gebrauchsdauer des Holzes indirekt, da sie das Maß der Gefährdung (Gebrauchsklasse, EN 335-1, 2006) bestimmen. Der Abbau des Holzes durch Organismen wird durch die Holztemperatur und die Holzfeuchte bestimmt, wobei letztere kritisch wird, wenn das Konstruktionsniveau niedrig ist. Die Dauerhaftigkeit eines Holzbauteils hängt von den vorliegenden Gebrauchsbedingungen, bzw. der jeweiligen Gefährdung ab. Um eine möglichst geringe Gefährdung zu erreichen, müssen Befeuchtung, Wasserfallen und Feuchtester durch konstruktive Maßnahmen vermieden werden. Hierzu zählen ein ausreichend großer Abstand zum Boden, Dachüberstände, abgeschrägte Oberflächen und viele weitere Konstruktionsdetails (u.a. Schmidt 2005).

Die Dimension und Form eines Bauteils beeinflusst ebenfalls die Gefährdung durch pilzlichen Befall. Willeitner (1982) berichtet von höheren Masseverlusten

an kürzeren Prüfkörpern in Laborversuchen. Ergebnisse aus Freilandstudien (Sell 1980) ergaben ein höheres Befallsrisiko für stärker dimensionierte Bauteile. Als Hauptursache nennt Sell (1980) die geringe Wärme- und Feuchteleitfähigkeit des Holzes, wodurch bei Klimaschwankungen, insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung, im oberflächennahen Bereich starke Holzfeuchtegradienten entstehen. Die Behinderung von Quell- und Schwindbewegungen führt zu Spannungen, die bei kleindimensionierten Bauteilen Formänderungen, bei größer dimensionierten Bauteilen Risse zur Folge hat, in die Wasser eindringt, dort verbleibt und somit die Voraussetzungen für einen Pilzbefall begünstigt. Diese Beobachtungen wurden durch Untersuchungen von Augusta (2007) nicht bestätigt.

Der umgekehrte Effekt tritt bei Holz im Erdkontakt auf, wo sich die Auswaschung von wasserlöslichen Extraktstoffen oder Holzschutzmitteln sowie der oberflächliche Abbau durch Bakterien auf größere Bauteile weniger stark auswirkt (Leicester *et al.* 2005).

Die Entstehung von Rissen, die Eintrittspforten für Wasser und Pilzsporen darstellen, und das Risiko einer langfristigen Befeuchtung werden durch die Beschattung eines Bauteils (durch Bäume, durch das Gebäude selbst oder durch weitere Gebäude) und die Ausrichtung (Wetterrichtung) beeinflusst.

2.2.3 Ausführungsqualität

Die Ausführungsqualität ist ein typischer indirekter Einfluss auf die Gebrauchsdauer, aber nicht spezifisch für den Werkstoff Holz. In Holzkonstruktionen stellen mögliche Wasserfallen ein großes Problem dar. Sie können durch defekte Isolierungen oder Dampfsperren, fehlende Hirnabdichtungen, offene Verbindungen oder Beschädigungen von Bauteilen während der Installation entstehen. Innerhalb eines Konzepts zur Gebrauchsdauervorhersage lässt sich dieser Einflussfaktor aber durch die direkten Abbaufaktoren Holzfeuchte und Holztemperatur darstellen.

2.2.4 Umgebungsbedingungen im Innen- und Außenbereich

Die abiotischen Einflüsse auf Holz sind qualitativ gewöhnlich dieselben im Innen- und Außenbereich und werden deshalb im Folgenden gemeinsam

behandelt. Die Resistenz des Holzes gegenüber äußeren mechanischen Beanspruchungen lässt sich durch Elastizitätsmodule, Poissonsche Konstanten und verschiedene Festigkeiten definieren. Weitere Beanspruchungen treten im Holz durch Quellung, Schwindung oder Wärmeausdehnung auf. In Kombination mit der Anisotropie des Holzes können sie zu Verformungen und Rissen führen. Darüber hinaus ist Holz ein viskoelastisches Material und seine mechanischen Eigenschaften sind somit zeitabhängig. Mechanische Agenzien wirken sich aber lediglich als indirekte Abbaufaktoren aus, da weder innere und äußere Beanspruchungen noch Festigkeitsabnahmen über längere Zeiträume die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen verringern, solange die statischen Anforderungen ausreichend berücksichtigt und biologischer Befall ausgeschlossen ist (Browne 1960, De Groot 1976).

Elektromagnetische Agenzien, z.B. Photodegradation durch Sonneneinstrahlung, können zur Entstehung von Rissen führen und so die Wegsamkeit des Holzes beeinflussen. Ionisierende Strahlung führt zu Festigkeitsverlusten des Holzes (Rackowski und Fabisiak 1987, Despot *et al.* 2007), die hierzu notwendigen hohen Strahlungsdosen treten jedoch normalerweise in der Praxis nicht auf.

Der Einfluss der Temperatur [*cf.* thermische Agenzien nach ISO 6241 (1984) Tab. 3] wird deutlich, wenn Holz über lange Zeit hohen Temperaturen ($> 105^{\circ}\text{C}$) ausgesetzt wird, und Festigkeitsverluste auftreten (Mönck 1987, Winandy 2001). Zusätzlich müssen Rissbildung und thermische Verformung berücksichtigt werden. Somit haben thermische Agenzien einen direkten und einen indirekten Einfluss auf die Gebrauchsdauer von Holz.

Die Korrosion von Holz durch Einwirkung aggressiver Medien wurde bei pH-Werten < 2 oder > 11 beobachtet (Kollmann 1951). Innerhalb dieser Spanne ist Holz inert und es bedarf einer langfristigen Exposition, bevor sich Veränderungen des Holzes in Form von Abbau der Zellwandbestandteile, Auswaschung von Inhaltstoffen oder mechanischer Zerstörung der Holzstruktur durch Kristallisationsdruck, feststellen lassen. Die zerstörende Wirkung geht von der Oberfläche aus und schreitet langsam nach innen voran (Erler 2000).

Abgesehen von extremen Situationen lässt sich der direkte Einfluss mechanischer, elektromagnetischer, thermischer und chemischer Agenzien auf

die Gebrauchsdauer von Holz durch eine ausreichende Dimensionierung der Bauteile problemlos kompensieren. Wesentlich bedeutender ist ihr indirekter Einfluss auf biotische Abbaufaktoren, die im Folgenden beschrieben werden.

2.2.5 Biotische Einflüsse

2.2.5.1 Pilze und Bakterien

Es wird zwischen holzverfärbenden Pilzen (Schimmel und Bläuepilze) und holzerstörenden Pilzen, die Weiß-, Braun- oder Moderfäule hervorrufen können, unterschieden. Im Gegensatz zu Weißfäulepilzen, die in der Lage sind, Cellulose, Hemicellulose und Lignin abzubauen, bauen Braun- und Moderfäulepilze vorwiegend Cellulose und Hemicellulose ab. Taxonomisch gehören die Braunfäulepilze zu den Basidiomyceten; die meisten Weißfäulepilze sind ebenfalls Basidiomyceten, einige auch Ascomyceten (Eriksson *et al.* 1990, Schmidt 2006). Moderfäulepilze gehören zu den Gruppen der Ascomyceten und Deuteromyceten (Schmidt 2006).

Die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Arten von holzverfärbenden und holzerstörenden Pilzen sowie Bakterien waren Gegenstand vieler Untersuchungen. Sowohl synergistische (Henningsson 1967, Schmidt 2006) als auch antagonistische Effekte (u.a. Weindling 1934, von Pechmann *et al.* 1964, Doi und Yamada 1992, Bürgel *et al.* 1994) wurden beobachtet (*cf.* Publikation IV, 7.4). In vielen Fällen sind zahlreiche Arten am Abbau des Holzes beteiligt. Antagonismen und Synergismen bestimmen die Sukzession der Holzpilze, wobei Holzerstörer den Erstbesiedlern, die oftmals nicht für den Holzabbau verantwortlich sind, folgen (Henningsson 1967, Käärik 1974, Clubbe 1980, Levy 1982, Dix und Webster 1995, Deacon 2006). Während der Schaden (Holzabbau), der durch Bakterien verursacht wird, im Vergleich zu Basidiomyceten eher gering ist, sind einige Bakterien in der Lage, unter sehr viel widrigeren Umgebungsbedingungen zu überleben und Holz abzubauen (u.a. Schmidt und Dietrichs 1976, Smith und Swann 1976, Butcher 1984, Singh *et al.* 1987, Nilsson *et al.* 1992, Clausen 1997, Wong und Singh 1997). Moderfäulepilze können ebenfalls unter extremen ökologischen Bedingungen Holz abbauen (u.a. Liese 1959, Liese und Ammer 1964, Findlay 1966, Blanchette *et al.* 1990, Jennings und Lysek 1999, Blanchette 2005) und folgen

oftmals Bakterien im Rahmen der Sukzession (Clubbe 1980). Bakterien sind somit nicht nur Erstbesiedler des Holzes, sondern fungieren auch als Wegbereiter für nachfolgende holzerstörende Pilze. Braun- und Weißfäulepilzen treten im Rahmen der Sukzession von Holzpilzen dagegen später auf (Deacon 2006).

2.2.5.2 Auftreten bestimmter Gruppen holzerstörender Organismen

Das Auftreten bestimmter Gruppen holzerstörender Organismen sowie der von ihnen ausgehende Befallsdruck hat einen direkten Einfluss auf die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen. Dies wird sehr deutlich am Beispiel einiger holzerstörender Insekten. So wird das Befalls- und Zerstörungspotential stark erhöht durch das Auftreten von Termiten, deren Verbreitungsgebiet jedoch geographisch begrenzt ist. Bei holzerstörenden Pilzen ist zwar davon auszugehen, dass ihre Sporen in der Luft ubiquitär sind, deren Häufigkeit und Anzahl aber zwischen verschiedenen Standorten, z.B. urbane oder Forststandorte, variiert. Studien zum Auftreten verschiedener Arten wären deshalb hilfreich für die Bestimmung von Infektionswegen und Unterschieden im Befallsdruck an verschiedenen Standorten. Hierzu existieren bereits vielversprechende Ansätze, wie serologische und molekularbiologische Methoden zur Identifizierung von Pilzen (u.a. Jellison und Jasalavich 2000, Schmidt 2000, Schmidt und Moreth 2000, Råberg *et al.* 2005). Inwieweit sich das Vorhandensein bestimmter Arten tatsächlich auf die Abbaugeschwindigkeit und somit auf die Gebrauchsdauer von Holz auswirkt, ist nicht vollständig geklärt: Carey (2002a, b) fand nur eine sehr schwache Korrelation zwischen der Zeit bis zum Auftreten holzerstörender Pilze an Prüfkörpern (Anwesenheit) und dem beginnenden Abbau in verschiedenen L-Joint-Prüfungen in Großbritannien. Von vielen Moderfäulepilzen ist hingegen bekannt, dass sie nur einen sehr langsam voranschreitenden Holzabbau verursachen (Käärik 1974, Schmidt 2006, Augusta 2007).

Art und Ausmaß der Schädigung des Holzes durch pilzlichen Abbau hängen ebenfalls von dem vorliegenden Fäuletyp und somit auch von den angreifenden Arten ab. Holzverfärbende Pilze (Schimmelpilze, Bläuepilze) rufen in erster Linie Beeinträchtigungen der Ästhetik hervor. Schimmelpilze können zusätzlich noch allergische Reaktionen auslösen. Bereits geringe Masseverluste durch die

Metabolisierung von Holzsubstanz durch holzerstörende Pilze, rufen deutliche Festigkeitsverluste hervor. Das Verhältnis zwischen Masseverlust und Festigkeitsverlust hängt vom vorliegenden Fäuletyp, bzw. den bevorzugt abgebauten Zellwandkomponenten ab (Wilcox 1977, Curling *et al.* 2002, Brischke *et al.* 2006).

2.2.5.3 Nährstoffe

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen kann zu einem limitierenden Faktor für das Wachstum von Pilzen werden. Holzverfärbende Pilze nutzen Zucker, Stärke und Stickstoffverbindungen als Kohlenstoffquelle. Während Schimmelpilze nur wenige Millimeter in das Holz eindringen, besiedeln Bläuepilze das gesamte nährstoffreiche Splintholzsubstrat (Schmidt 2006). Holzerstörende Pilze ernähren sich vorwiegend von den Zellwandkomponenten. Das Pilzwachstum kann von der Verfügbarkeit gelöster Zucker (Terziev und Nilsson 1999), gelösten Stickstoffs (Schmidt 2006) und einiger Spurenelemente und Vitamine (Schwantes 1996) bestimmt werden. Es ist davon auszugehen, dass bei jeder möglichen Nährstoffkombination im Holz eine oder mehrere Arten in der Lage sind, das Holz zu befallen. Liegt ein höheres Nährstoffangebot, z.B. im Erdkontakt durch Mineralien oder bakteriell synthetisierte Vitamine, vor, lässt sich ein Angriff durch weitere Arten sowie eine erhöhte Abbauaktivität erwarten. Die kürzere Gebrauchsdauer von Holz im Erdkontakt ist aber nicht nur auf ein erhöhtes Nährstoffangebot zurückzuführen, sondern vielmehr auf die höheren und konstanteren Feuchtebedingungen. Da Pilze auch ohne zusätzliche Nährstoffquelle Holz abbauen können, ist der Einfluss von Nährstoffen nicht überzubewerten.

2.2.5.4 pH-Wert

Die meisten Holzarten weisen pH-Werte zwischen 3,3 und 6,4 auf, wobei Kernholz in der Regel einen geringeren pH-Wert als Splintholz hat (Wagenführ und Schreiber 1985, Fengel und Wegener 1989). Holzerstörende Pilze tolerieren pH-Werte zwischen 2 und 8, wobei viele Basidiomyceten Werte zwischen 5 und 6 bevorzugen (Bavendamm 1974), Ascomyceten und Deuteromyceten jedoch toleranter sind (Schmidt 2006). Somit erscheint der Einfluss des pH-Wertes auf den pilzlichen Holzabbau und die Gebrauchsdauer von

Holz, abgesehen von extrem sauren und extrem alkalischen Bedingungen, vernachlässigbar gering.

2.2.5.5 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte, die von Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und der Wasseraufnahme durch Erdkontakt oder Leckagen abhängt, ist einer der entscheidenden Abbaufaktoren. Das Pilzwachstum hängt sehr eng mit der Möglichkeit der Wasseraufnahme für den Pilz zusammen. Pilzmycel ist nicht in der Lage, Wasser zu absorbieren, das in der Zellwand gebunden ist, so dass die minimale Holzfeuchte für pilzlichen Holzabbau leicht über Fasersättigung liegt (Schmidt 2006). Bei niedrigeren Feuchten werden die Enzyme, die der Pilz aussendet und die für den Abbau der Zellwandbestandteile verantwortlich sind, nicht transportiert und bleiben somit inaktiv. Ein Maß für die den Pilzen zur Verfügung stehende Feuchte ist der relative Dampfdruck im Substrat, der als Wasseraktivität a_w bezeichnet wird. Die Wasseraktivität hängt ab von der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur und dem pH-Wert des Substrates. Das a_w -Minimum der meisten holzerstörenden Basidiomyceten beträgt 0,97. Unterhalb $a_w = 0,60$ sind selbst xerotolerante Schimmelarten nicht mehr in der Lage, zu wachsen (Schmidt 2006). Viitanen (1994) und Schwantes (1996) berichten über den Zusammenhang zwischen Feuchteminima und der Temperatur: Je stärker die Temperatur vom Optimum abweicht, desto höher ist die für das Pilzwachstum notwendige Wasseraktivität.

Für praktische Zwecke werden Minima und Maxima für pilzliches Wachstum als Holzfeuchte in % ausgedrückt. Ammer (1963) gibt das Holzfeuchteminimum mit $u=30\%$ an. Das Optimum für die meisten relevanten Basidiomyceten liegt zwischen 40 und 70% (Ammer 1964, Rypáček 1966, Wälchli 1980, Viitanen und Ritschkoff 1991, Huckfeldt *et al.* 2005). Eine angebliche Ausnahme stellt *Serpula lacrymans* (Wulfen: Fr.) Schroeter apud Cohn dar, der in der Lage sein soll, Wasser mittels seiner Stränge über längere Strecken zum Ort des enzymatischen Abbaus zu transportieren (Wälchli 1980, Grosser 1985). Somit soll *S. lacrymans* Holz mit einer Feuchte unter 20% bewachsen können, wenn eine externe Feuchtequelle vorhanden ist. Experimentell nachgewiesen ist jedoch nur, dass die Stränge von *S. lacrymans* zur Leitung von Nährstoffen (Jennings 1987) dienen und nicht zum Wassertransport (Ridout 2000, Schmidt

2007). Die obere Feuchtegrenze für die meisten Basidiomyceten liegt bei $u=90\%$ (Bavendamm 1974), einige Pilze, z.B. *Gloeophyllum abietinum* (Bull.: Fr.) P. Karsten, weisen aber auch höhere Feuchtemaxima ($u>200\%$) auf (Huckfeldt *et al.* 2005, Huckfeldt und Schmid 2006). Ein sehr breites Feuchteoptimum weisen Bläuepilze ($u=40-130\%$) und Rotstreifepilze ($u=50-120\%$) auf (Schuhmacher und Schulz 1992, Schmidt 2006). Die obere Feuchtegrenze ist als untere Grenze des notwendigen Sauerstoffgehaltes anzusehen. Das Überleben und Wachstum von Pilzen ohne Sauerstoff ist zeitlich begrenzt: *Coniophora puteana* und *S. lacrymans* überlebten ohne Sauerstoff zwei bis sieben Tage (Bavendamm 1936), *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murrill mehr als zwei Jahre (Scheffer 1986). Rypáček (1966) gibt als minimalen Luftgehalt für pilzlichen Abbau 10-20 Vol% an. Zur Verhinderung von Lagerschäden durch Pilze wird deshalb Rundholz durch Wasserlagerung oder Beregnung so feucht gehalten, dass nicht genügend Luft in das Holz dringen kann (Liese und Peek 1987). Ein ähnlicher Effekt tritt bei der Lagerung von Rundholz in geschlossenen Folienzelten auf, die zu einer vollständigen Veratmung des Luftsauerstoffs durch noch lebende Parenchymzellen führt (Metzeler *et al.* 1993). Moderfäulepilze sind in der Lage, Holz auch im wasser-gesättigten Zustand, z.B. in Kühltürmen, anzugreifen, weil das Wasser durch den Sprinklereffekt für diese Pilzgruppe ausreichend mit Sauerstoff angereichert wird (Schmidt 2006). Die besondere Bedeutung des Abbaufaktors Holzfeuchte wurde in zahlreichen Studien zur Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten herausgestellt (u.a. Viitanen und Ritschkoff 1991, Rapp *et al.* 2000, Rydell *et al.* 2005) und ist in verschiedenen europäischen Normen verankert (u.a. EN 335-1, 2006, EN 335-2, 2006, EN 460, 1994).

2.2.5.6 Holztemperatur

Die Temperatur des Holzes ist der zweite sehr wichtige Einfluss auf die pilzliche Abbauaktivität. Die Minimaltemperatur ist im Normalfall 0°C , weil unterhalb des Gefrierpunktes in den Hyphen kein flüssiges Wasser mehr vorliegt, es sei denn, dass der Gefrierpunkt durch eine veränderte chemische Zusammensetzung in den Hyphen oder im Holz herabgesetzt ist (Jennings und Lysek 1999). Die Optimaltemperaturen für die Pilzaktivität sind stark artabhängig, liegen aber zwischen 20 und 40°C (Wälchli 1977, Viitanen 1996, Schmidt 2006). Hinzu

kommt, dass das Optimum für das Pilzwachstum nicht identisch mit dem Optimum für pilzlichen Holzabbau sein muss (Grinda 1975). Das Maximum für Mycelwachstum und Holzabbau liegt bei den meisten Arten zwischen 40 und 50 °C (Rypáček 1966, Viitanen und Ritschkoff, Schmidt 2006). Untersuchungen zum Einfluss der Holztemperatur, nicht der Lufttemperatur, im Freiland sind selten. Ein Vergleich verschiedener Versuchsstandorte zeigte jedoch eine tendenziell kürzere Gebrauchsdauer an wärmeren Standorten (Beesley *et al.* 1983, Grinda und Carey 2004, Augusta 2007).

2.2.5.7 Klimabedingungen

In verschiedenen Studien (u.a. Beesley *et al.* 1983, Creemers *et al.* 2002, Grinda und Carey 2004, Augusta 2007) wurde der starke Einfluss von Niederschlag und Lufttemperatur auf die Abbauraten im Freiland aufgezeigt, ohne jedoch eine straffe Korrelation zwischen den verschiedenen Klimaparametern und der Gebrauchsdauer der Prüfkörper zu erhalten. Scheffer (1971) nahm an, dass die Dauer und Verteilung von Niederschlägen einen kritischeren Einfluss als die Niederschlagssumme hat. Laborversuche von Viitanen (1996) und Freilanduntersuchungen von Rapp und Brischke (2004) ergaben, dass geringere Temperaturschwankungen zu höheren Abbauraten führen. Somit zeigt sich, dass die Amplituden der klimatischen Einflüsse, insbesondere von Feuchte und Temperatur, ein nicht unerheblicher Faktor für den Abbau des Holzes sind.

2.2.6 Gebrauchsbedingungen

Der Faktor Gebrauchsbedingungen umfasst all solche Einflüsse, die durch die Benutzung eines Bauteils entstehen. Hierzu gehören z.B. Abrieb und Vandalismus sowie Benutzungsfrequenz und –intensität. Die Größenordnung dieses Faktors ist schwer abzuschätzen, weil extensive statistische Studien notwendig wären, um die vielfältigen Untereinflüsse zu quantifizieren. Darüber hinaus sind "Gebrauchsbedingungen" nicht zwingend mit der biologischen Dauerhaftigkeit des Holzes verbunden. Für eine Gebrauchsdauervorhersage bleibt dieser Faktor somit in erster Näherung unberücksichtigt.

2.2.7 Pflege- und Wartungsniveau

Die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen lässt sich theoretisch unendlich verlängern, solange geeignete Pflege- und Wartungsarbeiten, z.B. das Erneuern von Anstrichen oder der Ersatz konstruktiver Schutzelemente, unternommen werden. Bleiben solche Maßnahmen aus, kann sich die Gebrauchsdauer von Bauteilen verkürzen (Derbyshire und Carey 2001), z.B. führen beschädigte Beschichtungen zu Feuchteanreicherungen im Holz und einem erhöhten Befallsrisiko. Das Pflege- und Wartungsniveau kann somit je nach eingesetztem Schutzsystem einen sehr bedeutenden Einfluss auf die Gebrauchsdauer von Bauteilen haben. Aufgrund der Vielzahl vorstellbarer Pflege- und Wartungsmaßnahmen wird dieser Faktor an dieser Stelle nicht vertiefend betrachtet.

2.3 Ansätze für Vorhersagemodelle

Die bisher beschriebenen Ansätze zur Gebrauchsdauervorhersage sind sehr heterogen in Bezug auf die Berücksichtigung der verschiedenen Abbaufaktoren (cf. Publikation I, 7.1). Im Folgenden werden verschiedene Ansätze, die von reiner Resistenzprüfung über Arbeiten, die weitere Umgebungseinflüsse berücksichtigen, bis hin zu einem allumfassenden Modellierungsansatz reichen, beschrieben.

2.3.1 Zusammenhang zwischen Gebrauchsklassen und Dauerhaftigkeitsklassen

Im Hinblick auf das Auftreten von holzerstörenden Organismen werden in EN 335-1 (2006) verschiedene Gebrauchsklassen (früher: Gefährdungsklassen), teilweise mit Unterklassen, unterschieden (Tab. 1). Die Einteilung hängt im Wesentlichen davon ab, ob das Holz Kontakt zum Erdboden hat und welche Feuchtebedingungen vorliegen. Detailliertere Informationen über die in den verschiedenen Gebrauchsklassen herrschenden Feuchtebedingungen enthält EN 335-2 (2006). Somit lässt sich aus dieser Norm zwar ableiten, dass mit steigender Gefährdung in Form von Feuchtebelastung, Erd- oder Meerwasserkontakt die zu erwartende Gebrauchsdauer eines Holzbauteils sinkt, eine Anleitung zur Gebrauchsdauervorhersage wird aber nicht gegeben.

Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz enthält EN 350-1 (1994). Fünf Klassen der Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen und Mikroorganismen zwischen "nicht dauerhaft" und "sehr dauerhaft" werden unterschieden. Grundlage für die Einstufung ist hierbei die relative Gebrauchsdauer von Prüfkörpern im Erdkontakt (EN 252, 1990) oder der relative Masseverlust durch Pilzangriff in Laborprüfungen (EN 113, 1997), jeweils bezogen auf Referenzen aus Kiefernspint. Verschiedenen ausgewählten Holzarten werden in EN 350-2 (1994) Dauerhaftigkeitsklassen zugewiesen, wobei sich die Einstufung nicht unbedingt auf andere Gebrauchsklassen übertragen lässt (Van Acker *et al.* 2003, Augusta 2007).

EN 460 (1994) stellt gewissermaßen die Verknüpfung zwischen Gebrauchsklassen und Dauerhaftigkeitsklassen dar und soll eine Anleitung für die Auswahl verschiedener Hölzer hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit in den verschiedenen Expositionen liefern. Weiterhin wird auch der Einfluss der Bauteildimension sowie konstruktiver Schutzmaßnahmen angesprochen, ohne aber eine Quantifizierung der verschiedenen Einflüsse auf die Gebrauchsdauer vorzunehmen. Nach EN 460 (1994) soll die Abschätzung der zu erwartenden Gebrauchsdauer durch Vergleich von bekannter Dauerhaftigkeit und Gebrauchsdauer verschiedener Holzarten und Bauteile erfolgen. Es wird somit durch die Verbindung von Gefährdung und Dauerhaftigkeit weder der Einfluss klimatischer Unterschiede berücksichtigt, noch eine konkrete Anleitung zur Gebrauchsdauervorhersage von Holz geliefert.

Tab. 1. Gebrauchs- und Holzfeuchtebedingungen sowie vorkommende Organismen in den verschiedenen Gebrauchsklassen nach EN 335-1 (2006) und EN 335-2 (2006).

Gebrauchs- klasse	Allgemeine Gebrauchs- bedingungen	Beschreibung der Exposition gegenüber Befeuchtung während des Gebrauchs	Organismen	
1	Innenbereich, abgedeckt	trocken, max. u=20%	holzerstörende Käfer	1T , wenn Termiten vorhanden sein könnten
2	Innenbereich oder abgedeckt	gelegentlich feucht (u>20%)	holzerstörende Käfer holzverfärbende Pilze holzerstörende Pilze	2T , wenn Termiten vorhanden sein könnten
3	3.1 Außenbereich, ohne Erdkontakt, geschützt	gelegentlich feucht (u>20%)	holzerstörende Käfer holzverfärbende Pilze holzerstörende Pilze	3.1T bzw. 3.2T , wenn Termiten vorhanden sein könnten
	3.2 Außenbereich, ohne Erdkontakt, ungeschützt	häufig feucht (u>20%)		
4	4.1 Außenbereich, in Kontakt mit Erde und/oder Süßwasser	vorwiegend oder ständig feucht (u>20%)	holzerstörende Käfer holzverfärbende Pilze holzerstörende Pilze Moderfäule	4.1T bzw. 4.2T , wenn Termiten vorhanden sein könnten
	4.2 Außenbereich, in Kontakt mit Erde (hohe Beanspruchung) und/oder Süßwasser	ständig feucht (u>20%)		
5	im Meerwasser	ständig feucht (u>20%)	holzerstörende Pilze Moderfäule Holzschädlinge im Meerwasser	A <i>Teredinodae</i> , <i>Limnoria</i> <hr/> B <i>Teredinodae</i> , <i>Limnoria</i> , teeröltolerante <i>Limnoria</i> <hr/> C <i>Teredinodae</i> , <i>Limnoria</i> , teeröltolerante <i>Limnoria</i> , <i>Pholadidae</i>

2.3.2 Klima-basierte Indizes

Scheffer (1971) entwickelte erstmals einen Klima-basierten Index, um das relative Potential eines Standortes hinsichtlich seines pilzlichen Holzabbaus außerhalb des Erdkontaktes einzuschätzen. Das Gefährdungspotential verschiedener Klimate in den USA wurde hierzu auf Basis von empirisch ermittelter

Abbauintensität an vier Freilandversuchsstandorten berechnet. Der Index errechnet sich aus den Monatsmittelwerten der Parameter Lufttemperatur und Anzahl von Tagen mit einer Niederschlagssumme $> 0,25$ mm (*cf.* Kapitel 3.3). Je höher der Index ist, desto höher ist auch die Gefährdung durch Pilzangriff, wobei der Index zwischen 0,0 in Yuma, Arizona und 137,5 in West Palm Beach, Florida im kontinentalen Teil der USA reicht.

Die Ungenauigkeit des Scheffer Climate Index wurde später u.a. von De Groot (1982) und Norén (2001) herausgestellt. Weitere Faktoren, wie Konstruktionsdetails, Mesoklima und Mikroklima bleiben durch den Index unberücksichtigt. Die Datenbasis für die Erstellung des Index scheint nicht ausreichend und der gesamte Ansatz zu stark vereinfacht. Eine zufriedenstellende Korrelation zwischen dem Index und tatsächlich an verschiedenen Standorten auftretendem Pilzbefall ließ sich somit bisher nicht nachweisen (Beesley *et al.* 1983, *cf.* Publikation V, 7.5).

Eine Studie von Beesley *et al.* (1983) zielte darauf ab, eine Rangliste für verschiedene australische Versuchsstandorte hinsichtlich der vorliegenden Gefährdung durch pilzlichen Holzabbau außerhalb der Erde aufzustellen und diese Gefährdungspotentiale mit Klimaparametern in Verbindung zu bringen. Es wurden beschichtete Prüfkörper an 27 verschiedenen Standorten in Australien und Papua-Neuguinea für drei Jahre exponiert. Der Vergleich der Abbaubewertungen mit verschiedenen Klimaparametern führte aber nicht zu einer straffen Korrelation, ebenso wie die Verwendung des Scheffer Climate Index.

Durch eine Gruppe europäischer Wissenschaftler wurde 1997 im Rahmen von COST Action E2 ("Wood durability") ein Ringversuch initiiert, um ein verbessertes europäisches Äquivalent zum Scheffer Climate Index zu entwickeln (Carey 2000, Van Acker 2003, Grinda und Carey 2004). Die Ergebnisse aus verschiedenen Dauerhaftigkeitsuntersuchungen im Freiland, die von 17 europäischen und einer US-amerikanischen Forschungseinrichtung (Hilo, Hawaii) durchgeführt wurden, sollten für die Erstellung eines "COST Euro Index for fungal decay" dienen. Obwohl sich signifikante Unterschiede in der Abbauintensität zwischen den Standorten ergaben, korrelierten die Abbauwerte nicht mit den makroklimatischen Daten, was sich darauf zurückführen lässt,

dass der gewählte Ansatz ähnlich einfach war wie der Scheffer Climate Index (Grinda und Carey 2004).

Daten aus Freilanduntersuchungen lassen sich aufgrund der klimatischen Unterschiede zwischen den Standorten nur schwer von einem Standort auf den nächsten übertragen, weshalb auch die Interpretation von natürlichen Bewitterungsversuchen schwierig ist. Der Zusammenhang zwischen Bewitterungsergebnissen und meteorologischen Bedingungen wurde von Creemers *et al.* (2002) an beschichteten Holzproben untersucht. Es wurde jedoch nur eine schwache Korrelation zwischen einem Klima-Index und den Ergebnissen der Freibewitterung für alle untersuchten Materialien gefunden und deshalb die Verwendung eines "Internal Comparison Products (ICP)" vorgeschlagen, um bessere Korrelationen zu erzielen. Weitere Studien an beschichteten Materialien mit dem Ziel, verschiedene Standorte zu vergleichen (Kropf *et al.* 1993, 1994, Roux *et al.* 1998), erbrachten zu geringe Unterschiede zwischen den Versuchsstandorten, um fundierte Aussagen zum Standorteinfluss zu treffen.

Aus den oben angeführten Versuchen, Klimadaten mit Abbaubewertungen zu korrelieren, lässt sich schließen, dass die Berücksichtigung weiterer Einflüsse oder eine detailliertere Berücksichtigung der Einflüsse notwendig ist, um straffere Korrelationen zwischen den Umgebungsbedingungen im Außenbereich und der Gebrauchsdauer von Holz zu erzielen.

2.3.3 Faktormethode

Eine Methodik zur Gebrauchsdauervorhersage und Gebrauchsdauerplanung enthält die zehnteilige Norm ISO 15686, deren Kernstück die Faktormethode (ISO 15686-1, 2000) ist. Die Methode ist benannt nach der Berechnung einer zu erwartenden Gebrauchsdauer (Estimated service life ESL) durch Multiplikation einer Referenzgebrauchsdauer (Reference service life RSL) mit verschiedenen Einflussfaktoren (Tab. 2), durch die Abweichungen von zuvor festgelegten Referenzbedingungen berücksichtigt werden. Die Faktormethode schließt wesentlich mehr mögliche Einflussfaktoren ein als beispielsweise der Scheffer Climate Index, der sich auf den Faktor E in Form von Niederschlag und Außentemperatur beschränkt.

Tab. 2. Faktoren, die die Gebrauchsdauer von Gebäuden oder deren Teilen beeinflussen sowie auf den Werkstoff Holz bezogene Beispiele in Anlehnung an ISO 15686-1 (2000).

Faktor	Beschreibung	Beispiel für Holzprodukte
A	Materialqualität	natürliche Resistenz, Schutzmittelbehandlung
B	Konstruktionsniveau	konstruktiver Holzschutz
C	Ausführungsqualität	Verbindungen, Abdichtungen
D	Umgebungsbedingungen im Innenbereich	Temperatur, relative Luftfeuchte, Kondensation
E	Umgebungsbedingungen im Außenbereich	Klima, Schlagregen, Beschattung
F	Gebrauchsbedingungen	Abrieb, mechanische Beanspruchungen
G	Pflege- und Wartungsniveau	Nachstreichen, Nachbesserungen

Die Faktoren D und E verdienen hierbei besondere Beachtung, weil sie alle biotischen und abiotischen Agenzien umfassen, die im Innen- und Außenbereich auf Holzbauteile einwirken. In ISO 6241 (1984) werden diese Abbauagenzien näher beschrieben und unterteilt in mechanische, elektromagnetische, thermische, chemische und biologische Agenzien (Tab. 3). Grundsätzlich gehen diese fünf Agenzien als Faktoren E₁ bis E₅ oder D₁ bis D₅ in die Faktormethode ein. Sie werden als weiteres Glied zur Produktbildung miteinbezogen.

Tab. 3. Abbauagenzien, die die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen beeinflussen (in Anlehnung an ISO 6241, 1984).

Wesen	Klasse	Beispiele für Holz im Außenbereich
Mechanische Agenzien	Gravitation, Kräfte und erzwungene oder verhinderte Deformationen, Bewegungsenergie, Vibrationen und Geräusche	Schnee-, Regen- und Wasserbelastung, Eisbildungsdruck, Wärme- und Feuchtedehnung, tägliche Temperaturunterschiede, Gefrieren/Tauen, Schlagregen,
Elektromagnetische Agenzien	Strahlung, Elektrizität, Magnetismus	Solare Strahlung
Thermische Agenzien	Extrem hohe/tiefe Temperaturen oder schnelle Temperaturwechsel	Hitze und Frost
Chemische Agenzien	Wasser und Lösungsmittel, oxidierende Agenzien, reduzierende Agenzien, Säuren, Basen, Salze, chemisch neutrale Agenzien	Wasser, oxidierende Agenzien (Sauerstoff, Ozon, Stickoxide), synergistische Effekte von oxidierenden Agenzien, Säuren, Salze, Seewasser, Rußpartikel
Biologische Agenzien	Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen	Pilze, Bakterien, Insekten, marine Holzzerstörer

Die Definition der Gebrauchsdauer nach ISO 15686-1 (2000) als "Zeitperiode nach der Installation, während der ein Gebäude oder dessen Teile die gestellten Anforderungen erfüllen" erscheint sinnvoll und kann als Grundlage für einen modelltheoretischen Ansatz dienen. Ebenso erscheint der Ansatz, alle vorstellbaren Einflussfaktoren in die Berechnung der Gebrauchsdauer einzu beziehen, als geeignet.

Wird die Faktormethode aber nicht nur als "Checkliste" verstanden, sondern tatsächlich als Berechnungsgrundlage verwendet, werden gewisse Nachteile dieser Methode sichtbar. Der größte Schwachpunkt ist der multiplikative Charakter der Berechnung, weil er das Risiko einer hohen Fehlerfortpflanzung birgt. Die berücksichtigten Faktoren müssen deshalb sehr akkurat bestimmt werden und dürfen nicht auf quantitativen Schätzungen basieren, da sonst die Unsicherheit mit jedem weiteren Faktor exponentiell ansteigt.

Modifikationen der Faktormethode wurden bereits von verschiedenen Autoren vorgeschlagen (Aarseth und Hovde 1999, Abu-Tair *et al.* 2002, Dickinson 2005, Nicoletta und De Pascale 2005, Re Cecconi und Iacono 2005, Englund 2006). Unter Berücksichtigung aller Vor- und Nachteile der Methode bleibt jedoch folgendes unumstritten: Die Gebrauchsdauer ist eine Funktion einer Referenzgebrauchsdauer, die von den jeweiligen Performance-Anforderungen und verschiedenen Abbaufaktoren abhängt. Diese Faktoren lassen sich als mathematische Variablen auffassen und wie folgt ausdrücken:

Gleichung 1. Berechnung der erwarteten Gebrauchsdauer (Estimated service life ESL) anhand einer Referenzgebrauchsdauer (Reference service life RSL) und verschiedenen Einflussfaktoren, modifiziert nach ISO 15686-1 (2000)

$$ESL = f(RSL, A, B, C, D, E, F, G)$$

2.3.4 Abbaumodelle

Intensive Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Entwicklung von Modellen zur Gebrauchsdauervorhersage für Holz wurden in Australien durchgeführt (Foliente *et al.* 2002, Leicester *et al.* 2003a, b, 2005, Francis und Norton 2006, Nguyen *et al.* 2007), wobei verschiedene Datenquellen berücksichtigt wurden. Ein vorläufiges Modell für den Angriff von Termiten wurde auf Basis von

Expertenbefragungen erstellt und dann mit Hilfe von Daten aus einer australienweiten Inspektion von 5000 Gebäuden kalibriert (Leicester *et al.* 2003b, 2007). Ein zweites vorläufiges Modell für den Angriff durch holzerstörende Pilze im Erdkontakt wurde auf Basis von Freilandversuchen mit 5000 Prüfkörpern, die an fünf verschiedenen Standorten über 30 Jahre exponiert wurden, erstellt (Leicester *et al.* 2003a, Wang *et al.* 2007). Diese Versuche umfassten unbehandeltes Holz von 77 verschiedenen Arten sowie mit einem Kupfer-Chrom-Arsen-haltigen Holzschutzmittel und mit Steinkohlenteeröl behandeltes Holz. Das Modell wurde anschließend anhand von Untersuchungen an Bauteilen in Realdimensionen kalibriert und um den Einfluss von Wartungs- und Pflegemaßnahmen erweitert. Ein drittes Modell wurde schließlich für Holz, das ohne Erdkontakt eingesetzt wird, entwickelt, ebenfalls basierend auf Daten aus Langzeituntersuchungen und Expertenbefragungen. Alle drei Modelle bedienen sich verschiedener Datenquellen und wurden so gestaltet, dass sich weitere (Zusatz-) Informationen in den bestehenden Ansatz integrieren lassen.

In Kombination mit einer benutzerfreundlichen Software stellen die Modelle einen vorbildlichen Ansatz für die Gebrauchsdauervorhersage von Holzbauteilen dar. Nachteil aller drei Modelle scheint aber die bisher lückenhafte Datenbasis zu sein. Dort, wo nicht genügend Informationen aus experimentellen Arbeiten zur Verfügung standen, wurden Experten befragt, um die Informationslücken zu schließen. Dies scheint vorläufig ein sehr hilfreicher Ansatz zu sein, um zunächst eine Modellstruktur aufzubauen. Später dürfte es aber unerlässlich sein, die "Lücken" durch wissenschaftlich verlässliche Daten zu schließen.

2.4 Ziele der Arbeit

Aus der Betrachtung der Literatur wurde deutlich, dass der Kenntnisstand über die verschiedenen potentiellen Abbaufaktoren sehr heterogen ist: Einzelne Faktoren, z.B. die natürliche Resistenz des Holzes gegenüber holzerstörenden Organismen, sind sehr detailliert untersucht. Die Kenntnisse über andere Faktoren sind dagegen eher lückenhaft (z.B. Klimabedingungen) oder basieren auf Ergebnissen aus Laboruntersuchungen (z.B. Holzfeuchte) und lassen sich

oftmals nicht auf die im Freiland oder im tatsächlichen Gebrauch herrschenden Bedingungen übertragen. Somit lassen sich quantitative Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Abbaufaktoren und der unter Realbedingungen zu erwartenden Gebrauchsdauer des Holzes nur selten finden. Ähnlich heterogen stellen sich die bisher entwickelten Ansätze zur Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holzbauteilen dar: Ihnen liegen unterschiedliche konzeptionelle Ansätze, aber auch qualitativ unterschiedliche Datenbasen zugrunde. Vor diesem Hintergrund wurden für die vorliegende Arbeit als Beitrag zu einer verbesserten Methodik für die Gebrauchsdauervorhersage von Holz die folgenden Ziele formuliert:

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit war es, sowohl konzeptionell als auch experimentell eine Grundlage zur Erstellung eines Modells zur Vorhersage der Gebrauchsdauer von feuchtebeanspruchten Holzbauteilen zu schaffen.

Faktoren, die die Besiedlung und den Abbau von Holz durch holzerstörende Organismen beeinflussen, sollten ermittelt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Abschätzung der Gebrauchsdauer von Holzbauteilen ("Service life prediction") bewertet werden. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse über verschiedene Abbaufaktoren sollte ein Konzept für die Erstellung eines Modells zur Abschätzung der Gebrauchsdauer von Holz erarbeitet werden (**Publikation I, 7.1**).

Weiteres Ziel dieser Arbeit war es, Holzfeuchte und Holztemperatur, die als Schlüsselfaktoren für den pilzlichen Abbau des Holzes identifiziert wurden, für die Erstellung von Dosis-Wirkungsfunktionen zu quantifizieren. Hierzu war eine Methode zu entwickeln, die sich insbesondere für Freilandversuche und Untersuchungen an Objekten im Gebrauch eignet (**Publikation II, 7.2**). Das zu entwickelnde Messsystem sollte an verschiedenen Holzbauwerken hinsichtlich Plausibilität der gewonnenen Daten und Zuverlässigkeit der Messgeräte während Langzeituntersuchungen (Monitoring) überprüft werden (**Publikation III, 7.3**).

Weiterhin sollten im Rahmen von Freilandversuchen an verschiedenen Standorten ausgewählte Einflussfaktoren, wie Holzfeuchte und Holztemperatur (**Publikation IV, 7.4, und V, 7.5**), Vorkommen holzerstörender Pilze, Fäuletypen und Sukzessionsstadium (**Publikation VI, 7.6**), Bodensubstrat (**Publikation VII,**

7.7) und Mikroklima (**Publikation IV, 7.4**), quantitativ untersucht und mit den zugehörigen Abbauintensitäten verglichen werden. Die aus den experimentellen Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse sollten dazu dienen, grundsätzliche Annahmen für die Struktur eines Vorhersagemodells weiterzuentwickeln und zu präzisieren (**Publikation IV, 7.4, und V, 7.5**).

Vor dem Hintergrund, europaweit eine harmonisierte Standardisierung anzustreben, sollten Wege aufgezeigt werden, die Performance (Leistungsfähigkeit) von Holzprodukten in verschiedenen Einbausituationen praxisorientiert zu klassifizieren (**Publikation VIII, 8.1**).

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Automatisierte Holzfeuchte- und Holztemperaturmessung

Zur Bestimmung des Einflusses von Holzfeuchte und Holztemperatur auf die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen wurden Langzeit-Messungen dieser beiden Parameter in Freilandversuchen (Publikation IV, 7.4, und V, 7.5) und an Bauwerken im Gebrauch (Publikation III, 7.3) durchgeführt. Für die Messung der Holzfeuchte wurde ein auf dem elektrischen Widerstandsprinzip basierendes Messsystem, bestehend aus in das Holz eingeleimten Elektroden und batteriebetriebenen Datenaufzeichnungsgeräten (Datenlogger) entwickelt, das in Publikation II (7.2) detailliert beschrieben wird. Das geeigneteste und letztlich für weitere Untersuchungen verwendete Messsystem wird im Folgenden beschrieben:

Polyamidummantelte Edelstahlkabel (Kerndurchmesser: 1,2 mm) wurden als Elektroden in vorgebohrte Löcher mit einem Durchmesser von 4 mm in das Holz eingeleimt. Die Lochtiefe hing hierbei von der jeweils gewünschten Messtiefe ab. Der Abstand zwischen den Elektroden betrug 30 mm parallel zur Faser und 6 mm quer zur Faser (Abb. 1), um das Risiko einer Rissbildung zu minimieren. Das Einleimen erfolgte mit einem Zwei-Komponenten-Epoxid-Klebstoff, der durch Zugabe von Graphitpulver leitfähig gemacht wurde, und einem isolierenden Epoxid-Klebstoff zum Verfüllen der Bohrlöcher. Die Formulierung der beiden Klebstoffe ist Tab. 4 zu entnehmen und wurde hinsichtlich Viskosität und Leitfähigkeit optimiert (*cf.* Publikation II, 7.2).

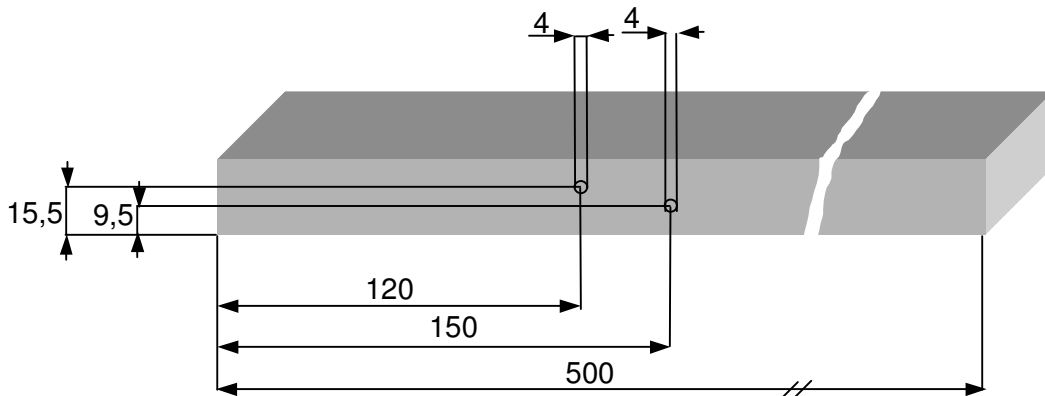


Abb. 1. Prüfkörper in Anlehnung an EN 252 (1990) und Anordnung von Bohrlöchern zur Installation von Elektroden (alle Angaben in mm).

Tab. 4. Formulierung des leitfähigen und des isolierenden Epoxid-Klebstoffes zum Einleimen von Elektroden in Holz.

Klebstoff	Bestandteile	Mischungsverhältnis
Leitfähiger Klebstoff	Epoxidharz L, Conrad Germany, Art.Nr.: 236349-62	19,2 g / 100 g
	Härter L, Conrad Germany, Art.Nr.: 236357-62	5,8 g / 100 g
	Ethanol	40,0 g / 100 g
	Graphitpulver (Körnung <50 µm)	35,0 g / 100 g
Isolierender Klebstoff	Epoxidharz L, Conrad Germany, Art.Nr.: 236349-62	58,8 g / 100 g
	Härter L, Conrad Germany, Art.Nr.: 236357-62	17,7 g / 100 g
	Weizenmehl (Typ 405)	23,5 g / 100 g

Es wurden 0,1 ml des leitfähigen Klebstoffes auf den Boden der Bohrlöcher injiziert. An der Elektrodenspitze wurden die ersten 5 mm der Polyamidummantelung entfernt und die Elektrode in den Klebstoff gedrückt. Nach 24-stündigem Aushärten wurde das Bohrloch mit dem isolierenden Klebstoff verfüllt (Abb. 2).

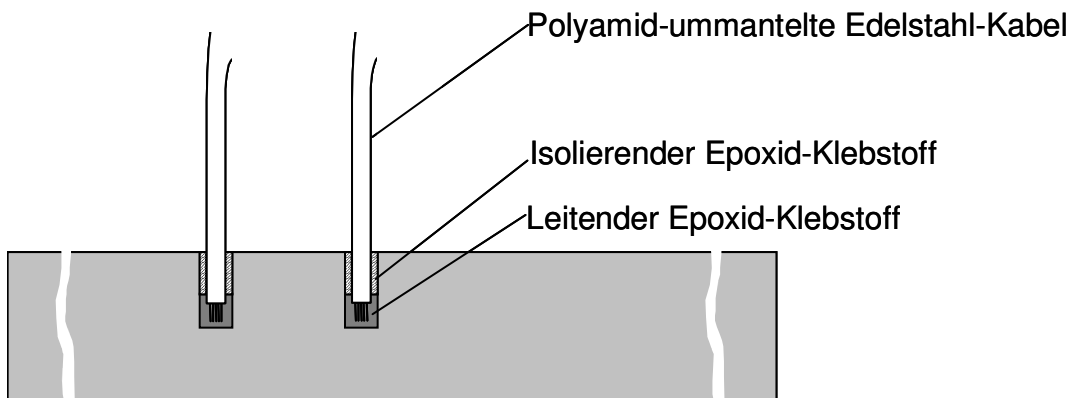


Abb. 2. Schematischer Querschnitt durch einen Prüfkörper mit eingeleimten Elektroden.

Die jeweils zwei zu einer Messstelle gehörenden Elektroden wurden an Datenlogger "Materialfox Mini", die von der Firma Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding in Zusammenarbeit mit der BFH entwickelt wurden, verbunden. Die Datenlogger wiesen eine Kapazität von 16000 Speicherplätzen, drei Messkanäle und einen Messbereich von $2 \cdot 10^4 \Omega$ bis $5 \cdot 10^8 \Omega$ auf. Die Messung erfolgte täglich um 24:00 Uhr. Der elektrische Widerstand des Holzes wurde über die zum Entladen eines Kondensators durch das Holz benötigte Zeit ermittelt (discharge-time measurement).

Für den Einsatz im Freiland wurden die Datenlogger mit Lithium-Thionylchlorid-Batterien (Typ SL-770, Sonnenschein Lithium GmbH, Buedingen) ausgestattet. Die Batteriespannung betrug 3,6 V, die Nennkapazität 7,2 Ah mit einem Kapazitätsverlust im Normalklima von weniger als 1% pro Jahr. Bei Anschluss von drei Datenloggern an eine Batterie ließ sich eine Laufzeit von fünf Jahren erwarten.

Das gesamte Messsystem wurde vor seinem Einsatz im Freiland bei verschiedenen Holzfeuchten ($u = 15, 25$ und 50%) und Holztemperaturen ($T = 4, 20$ und 36°C) für die zu untersuchenden Holzarten Kiefernspint (*Pinus sylvestris* L.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco) und Fichte (*Picea abies* Karst.) kalibriert (cf. Kapitel 4.2 und Publikation II, 7.2). Hierzu wurden gravimetrische und elektrische Holzfeuchtemessungen im Vergleich durchgeführt, Widerstandskennlinien für die verschiedenen Holzarten mit jeweils drei verschiedenen Herkunftten aufgenommen und eine Temperaturkompensation des elektrischen Widerstandes vorgenommen.

Für den in Publikation III (7.3) beschriebenen Einsatz des Holzfeuchtemesssystems an Bauwerken in Gebrauch (Fußgängerbrücke in Essing) war eine Modifikation der Messelektroden notwendig: Die Installation von Messstellen hatte im Freien ohne Wetterschutz, z.T. in großer Höhe und von der Unterseite der zu untersuchenden Bauteile aus zu erfolgen. Das Einleimen von Elektroden vor Ort war somit nicht möglich. Des Weiteren waren diverse Messstellen bereits von braunfäuleerregenden Pilzen befallen und das Holz abgebaut und somit ein Einfluss des pilzlichen Abbaus auf die Leitfähigkeit des Holzes zu erwarten. An der Essinger Brücke wurden deshalb mit einem organischen Holzschutzmittel (Wolvac LO-F, Dr. Wolman GmbH, Sinzheim, cf.

Table 7.3-2) imprägnierte Holzdübel mit bereits im Labor eingeleimten Elektroden installiert. Abb. 3 zeigt einen solchen Messdübel im Längsschnitt mit einem Paar eingeleimter Elektroden.



Abb. 3. Längsschnitt durch einen Messdübel aus Kiefernspint, imprägniert mit einem Tebuconazol-haltigen Holzschutzmittel, einschließlich einem Paar eingeleimter Messelektroden.

Die Messdübel (Durchmesser: 13 mm, Länge: 60 mm) wurden aus Kiefernspintholz hergestellt. In axialer Richtung wurden im Abstand von ca. 5 mm zwei Löcher (Durchmesser: 2 mm) mit einer Tiefe von 15 mm und 60 mm gebohrt. Analog zu der oben beschriebenen Weise wurden zwei Edelstahlkabel in die Dübel eingeleimt. Beide Bohrlöcher wurden zusätzlich mit nicht-leitender Epoxidvergussmasse gefüllt (Abb. 3). Die Messung des elektrischen Widerstandes erfolgte somit in axialer Richtung mit einem Versatz um ca. 5 mm quer zur Faserrichtung über eine Messstrecke von ca. 30 mm.

Vor Untersuchungsbeginn an der Essinger Brücke wurden sowohl die Eignung von Messdübeln zur Holzfeuchtemessung als auch der Einfluss des zur Imprägnierung verwendeten organischen Schutzmittels auf die elektrische Leitfähigkeit des Holzes untersucht. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen sind detailliert in Publikation III (7.3) beschrieben und lassen sich wie folgt zusammenfassen: 1. Die Imprägnierung mit Wolvac LO-F hatte keinen signifikanten Einfluss auf die elektrische Holzfeuchtemessung und 2. ein Vergleich zwischen gravimetrischer und elektrischer Holzfeuchtemessung an den Messdübeln ergab vernachlässigbar kleine Unterschiede. Der Einsatz von mit Schutzmitteln imprägnierten Messdübeln für In-situ-Messungen erschien somit als geeignete Lösung.

Für die Messung der Temperatur im bzw. am Holz (cf. Kapitel 3.2.3) wurden Datenlogger "Thermofox Mini" (Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding) mit jeweils drei herausgeführten Temperatursensoren verwendet. Es wurden

Tagesminimum-, Tagesmaximumwerte und die Temperatur um 24:00 Uhr aufgezeichnet.

3.2 Doppellagen-Versuche an verschiedenen Standorten

Zur Untersuchung des Einflusses ausgewählter Abbaufaktoren (Klima, Mikroklima, Holzfeuchte und Holztemperatur, sowie Vorkommen holzzerstörender Pilze, Fäuletypen und Sukzessionsstadien) wurden Freilandversuche außerhalb des Erdkontakts durchgeführt (Publikation IV, 7.4, V, 7.5 und VI, 7.6). Um ein möglichst breites Spektrum an klimatischen und biologischen Bedingungen zu erreichen, wurden die Versuchsaufbauten an insgesamt 24 Standorten unter teilweise unterschiedlichen Expositionsbedingungen ausgebracht.

3.2.1 Exposition der Prüfkörper

Es wurden Doppellagenversuche in Anlehnung an Rapp und Augusta (2004) mit Kiefernspiltholz (*Pinus sylvestris*) und Douglasienkernholz (*Pseudotsuga menziesii*) durchgeführt (Publikation IV, 7.4, und V, 7.5) Die Doppellagen-Testsets bestanden aus jeweils 23 Prüfkörpern mit den Abmessungen 500 x 50 x 25 mm³, die in zwei horizontalen, gegeneinander um eine halbe Prüfkörperbreite verschobenen Lagen übereinander angeordnet wurden. Die untere Lage bestand aus sechs Kiefern- und sechs Douglasienprüfkörpern, die obere Lage aus sechs Kiefern- und fünf Douglasienhölzern. Abb. 4 ist die Anordnung der Prüfkörper, die Lagerung auf mit Bitumenschweißbahnen abgedeckten und mit CKB-Salz imprägnierten Fichtenkanthölzern und die seitliche Abdeckung der Hirnenden der Prüfkörper zu entnehmen. Diese Doppellagen-Anordnung stellt eine Wasserfalle dar und wird deshalb für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen in einer besonders stark beanspruchten Situation innerhalb der Gebrauchsklasse 3 (EN 335-1, 2006) eingesetzt.



Abb. 4. Links: Doppellagen-Testset, in dem die obere Prüfkörperlage horizontal um 25 mm zur unteren Lage versetzt ist. Prüfkörper werden durch Bitumenschweißbahn von den CKB-imprägnierten Auflagern getrennt. Rechts: Künstliche Beschattung eines Doppellagen-Testsets durch ein Textilgewebe.

Ein Testset bildete somit ein geschlossenes Deck ($73 \times 65 \times 21 \text{ cm}^3$) und wurde entweder auf gepflastertem Boden oder auf einer wasserdurchlässigen Gartenfolie platziert, um Grasbewuchs auszuschließen. Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Mikroklimata wurden einige Testsets in einer mit einem wasserdurchlässigen Textilgewebe bespannten Sperrholzkiste ($90 \times 90 \times 30 \text{ cm}^3$) platziert, um eine künstliche Beschattung der Prüfkörper zu erzeugen (Abb. 4, rechts).

Die Prüfkörper wurden jährlich hinsichtlich des Abbaus durch holzerstörende Pilze bewertet. Hierzu wurden mit Hilfe eines Messer-Picktests (EN 252, 1990) Ausbreitung und Tiefe des Pilzbefalls ermittelt und eine Bewertung in Anlehnung an EN 252 (1990), wie in Tab. 5 beschrieben, vorgenommen.

Tab. 5. Bewertungskriterien für die Prüfung der Dauerhaftigkeit von Holz im Freiland (in Anlehnung an EN 252, 1990).

Bewertungsziffer	Einstufung	Bewertungskriterien
0	kein Angriff	Keinerlei Veränderungen, mit Ausnahme von Verfärbungen, die jedoch nicht mit einer Erweichung des Holzes verbunden sind.
1	leichter Angriff	Wahrnehmbare Veränderungen, die aber in ihrem Umfang und ihrer Lage oder Verteilung begrenzt sind: Veränderungen, die äußerlich durch einen oberflächlichen Abbau erkennbar sind; Weichwerden des Holzes bis zu einer Tiefe von 1 mm.
2	mittlerer Angriff	Deutliche Veränderungen mäßigen Umfangs mit folgenden Erscheinungsbildern: Veränderungen in Form von Weichwerden des Holzes bis zu einer augenscheinlichen Tiefe von 3 mm.
3	starker Angriff	Starke Veränderungen: Erheblicher, großflächiger Abbau des Holzes ab einer Tiefe von 3 mm.
4	Ausfall	Durchbrechen des Holzstabes bei der Schlagprüfung im Versuchsfeld.

Weiterhin wurde im Rahmen der jährlichen Bewertung für jeden befallenen Prüfkörper der vorliegende Fäuletyp makroskopisch bestimmt und dokumentiert. Es wurde zwischen Braunfäule, Weißfäule und Moderfäule unterschieden.

3.2.2 Charakterisierung der Standorte

Es wurden insgesamt 28 Doppellagen-Testsets an verschiedenen Standorten in Europa exponiert (Abb. 5). Die verschiedenen Standorte mit den jeweiligen Kennwerten sind Tab. 6 zu entnehmen. Die bisherige Expositionsdauer liegt zwischen zwei und sieben Jahren. Für die Auswertung der gewonnenen Daten wurden nur solche Testsets mit einer Expositionsdauer von mindestens vier Jahren herangezogen; der Standort Oslo (zwei Jahre Expositionsdauer) wurde somit nicht berücksichtigt. An den Standorten Hamburg, Reulbach, Stuttgart und Freiburg wurden jeweils zwei Testsets exponiert, ein frei exponiertes Set ("Sonne") und ein künstlich beschattetes Set ("Schatten"). Am Standort Hamburg wurden Testsets im tropischen Gewächshaus der BFH ganzjährig, bzw. halbjährig (15. Okt. - 15. Mai) exponiert, um die mikroklimatischen Bedingungen weiter zu verschärfen (Tab. 6).

Tab. 6. Kennwerte der Freilandversuchsstandorte (Geographische Koordinaten der Standorte sind dem Anhang, Tab. 17, zu entnehmen).

Standort und Exposition	Länder -Code	Höhe über NN [m]	Durchschnittl. Lufttemperatur [°C]	Jahresniederschlags-summe [mm]	Expositionsbeginn	Letzte Auswertung
Hamburg Sonne/Schatten	D	35	10,6	874	07/2000	04/2007
Gewächshaus	D	35	21,6	6257	07/2000	04/2007
Gewächshaus Winter	D	35	18,6	4092	07/2000	04/2007
Reulbach Sonne/Schatten	D	620	7,5	820	07/2000	08/2006
Stuttgart Sonne/Schatten	D	459	9,9	741	07/2000	08/2006
Freiburg Sonne/Schatten	D	302	12,1	911	07/2000	08/2006
Oberrottwil	D	221	11,7	731	12/2000	08/2006
Feldberg	D	1496	4,3	1588	12/2000	08/2006
Bühlertal	D	465	9,8	1664	12/2000	08/2006
Hornisgrinde	D	1131	6,0	2030	12/2000	08/2006
Hinterzarten	D	887	7,0	1586	12/2000	08/2006
Schömberg	D	635	8,0	954	12/2000	10/2006
Heilbronn/Heidelberg ¹⁰⁾	D	173/111	11,2/11,7	769/679	12/2000	08/2006
Dobel	D	706	9,0	1473	12/2000	08/2006
St. Märgen	D	908	8,2	1834	12/2000	08/2006
Uppsala	S	7	6,8	579	05/2001	09/2006
Ljubljana	SLO	299	11,3	1330	04/2001	06/2006
Zagreb	HRO	123	10,7	910	08/2002	06/2006
London	GB	62	11,9	649	07/2002	09/2006
Garston	GB	90	10,7	515	07/2002	09/2006
Portsmouth	GB	1	11,6	667	04/2001	09/2006
Ghent	B	9	10,9	758	08/2002	11/2006
Bordeaux	F	4	14,0	798	01/2001	10/2006
Oslo	N	124	7,3	782	08/2004	06/2006

¹⁾ Durchschnitt von 2000-2005²⁾ Durchschnitt von 2001-2005³⁾ Äquivalent zu einer Sprühmenge von 120 l pro Woche⁴⁾ Durchschnitt von 2000-2004⁵⁾ Durchschnitt von 2000-2006⁶⁾ Durchschnitt von 2002-2006⁷⁾ Durchschnitt von Juli 2002-Juni 2006⁸⁾ Durchschnitt von 2002-2005⁹⁾ Durchschnitt von 2000-2003¹⁰⁾ Standort wurde im Oktober 2003 von Heilbronn nach Heidelberg verlegt, Durchschnitt von 2000-2003, bzw. 2004-2006¹¹⁾ Durchschnitt von 2003-2006, Standort wurde aufgrund zu kurzer Expositionsdauer bisher nicht berücksichtigt.

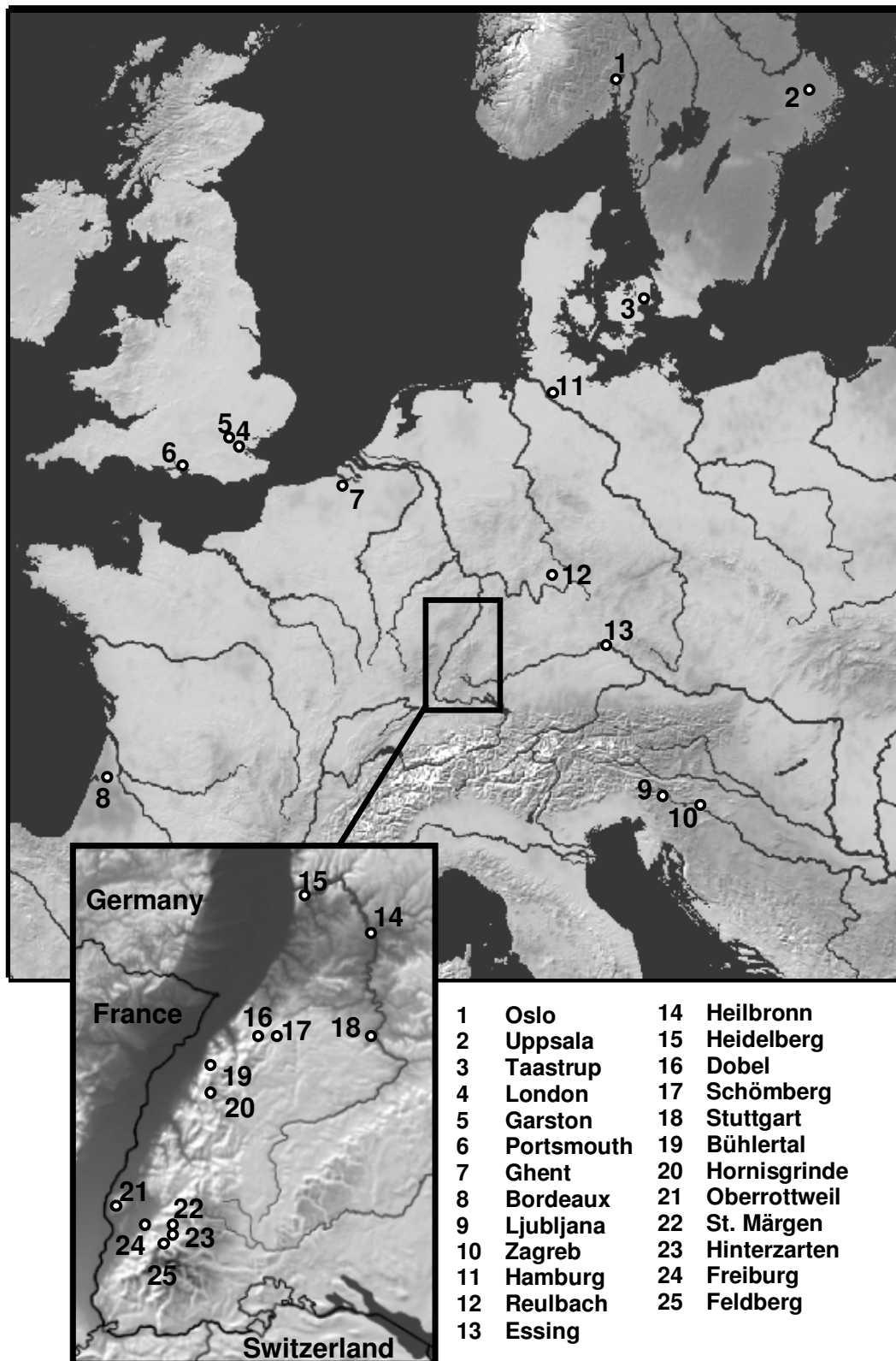


Abb. 5. Übersichtskarte der Standorte für Freilandversuche und Untersuchungen an Bauwerken.

3.2.3 Erfassung von Holzfeuchte und Holztemperatur

Tägliche Holzfeuchte- und Holztemperaturmessungen wurden an allen Doppellagen-Testsets durchgeführt, um einerseits den Einfluss unterschiedlicher Mikroklimata auf diese beiden Abbaufaktoren zu ermitteln und andererseits die täglich auf das Holz einwirkende Belastung (Dosis) in Form von Feuchte und Temperatur für die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen zu quantifizieren.

Hierzu wurde jeweils um Mitternacht die Holzfeuchte an drei Kiefern-splint- und drei Douglasienprüfkörpern in der unteren Lage jedes Testsets gemessen und aufgezeichnet. Genauere Angaben zum Messbereich und zur Messgenauigkeit des verwendeten Messsystems finden sich in Kapitel 4.2 und in Publikation II (7.2).

Folgende Temperaturmessungen wurden im Rahmen der Doppellagen-Versuche durchgeführt:

- Tägliche Aufzeichnung von mittlerer, Minimum- und Maximumtemperatur unterhalb der unteren Lage jedes Testsets (cf. Publikation IV, 7.4, und V, 7.5).
- Tägliche Aufzeichnung von mittlerer, Minimum- und Maximumtemperatur zwischen den Lagen an den Standorten Hamburg, Stuttgart, Freiburg und Reulbach jeweils für Kiefer Sonne, Douglasie Sonne und Kiefer Schatten (cf. Publikation IV, 7.4).
- Zweistündliche Aufzeichnung der Holztemperatur zwischen den Lagen in Hamburg Sonne und Schatten über einen Zeitraum von 11 Monaten (cf. Publikation IV, 7.4).

3.3 Erfassung von Klimadaten und Berechnung des Scheffer Climate Index

Um auch den Einfluss des Makroklimas auf den Holzabbau und somit die Gebrauchsdauer des Holzes zu ermitteln, wurden alle im vorhergehenden Kapitel 3.2 beschriebenen Versuchsstandorte so gewählt, dass sich eine offizielle Wetterstation in der Nähe zu den ausgebrachten Prüfkörpern befand, um eine ausreichend gesicherte Korrelationsbetrachtung zuzulassen. Über den gesamten Versuchszeitraum wurden Tageswerte von Minimumtemperatur,

Maximumtemperatur, Durchschnittstemperatur und Niederschlag aufgenommen und unter anderem für die Berechnung des Scheffer Climate Index herangezogen (cf. Kapitel 2.3.2). Der Index basiert auf den Parametern Lufttemperatur und Niederschlagsverteilung und wird wie folgt berechnet:

Gleichung 2. Scheffer Climate Index

$$\text{Scheffer Climate Index} = \frac{\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dez}} [(T - 2)(D - 3)]}{16,7}$$

$\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dez}}$ Summe der Monate Januar bis Dezember

T mittlere Tagestemperatur des Monats in °C

D mittlere Anzahl von Tagen mit mehr als 0,25 mm Niederschlag pro Monat

In der vorliegenden Arbeit wurde der Scheffer Climate Index für verschiedene Standorte ermittelt (cf. Kapitel 4.3.2). Der Index wurde hierzu monatlich berechnet, für jedes Expositionsintervall kumuliert und mit den zugehörigen mittleren Bewertungen des Abbaus durch holzerstörende Pilze korreliert.

3.4 Eingrabeversuch mit verschiedenen Bodensubstraten und Modifikationen des Holz-Boden-Kontaktes

Der Einfluss verschiedener Bodensubstrate und Modifikationen des Holz-Boden-Kontaktes auf die Dauerhaftigkeit bzw. die Gebrauchsdauer, von Kiefersplintholz (*Pinus sylvestris*) und Eichenkernholz (*Quercus petraea* Liebl.) im Erdkontakt (Gebrauchsklasse 4, EN 335-1, 2006) wurde in einem Mini-Stake-Eingrabeversuch ermittelt (Publikation VII, 7.7). Hierzu wurden zehn Prüfkörper je Holzart/Expositions-Kombination von 200 x 20 x 8 mm³ mit einer Orientierung der Jahrringe von 90 ± 15° zu den Prüfkörperbreitseiten in verschiedenen Bodensubstraten exponiert. Die Prüfkörper wurden mit zwei Drittel ihrer Länge und einem Abstand von 10 cm zueinander in den Boden gesteckt.

Zusätzlich wurden jeweils zehn Kiefersplint-Prüfkörper auf 3/4 ihrer Länge einschließlich der einzugrabenden Hirnholzfläche in PE-Folie gewickelt, verklebt und in Testfeld-Boden und Kompost exponiert (cf. Abb. 6). Eine Beschreibung der verwendeten Bodensubstrate ist Tab. 7 zu entnehmen. Die Wasserhalte-

kapazität wurde nach ENV 807 (2001) bestimmt. Als weitere Modifikation des Kontaktes zwischen Holz und Boden wurden Kiefernslint-Prüfkörper in Beton exponiert. Hierzu wurden die Prüfkörper in Zylinder mit 65 mm Durchmesser einbetoniert; die Betonblöcke wurden dann im Testfeld-Boden exponiert (cf. Abb. 6).

Eine jährliche Abbaubewertung erfolgte mit Hilfe eines Messer-Picktests (EN 252 (1990), cf. Tab. 5, Kapitel 3.2).

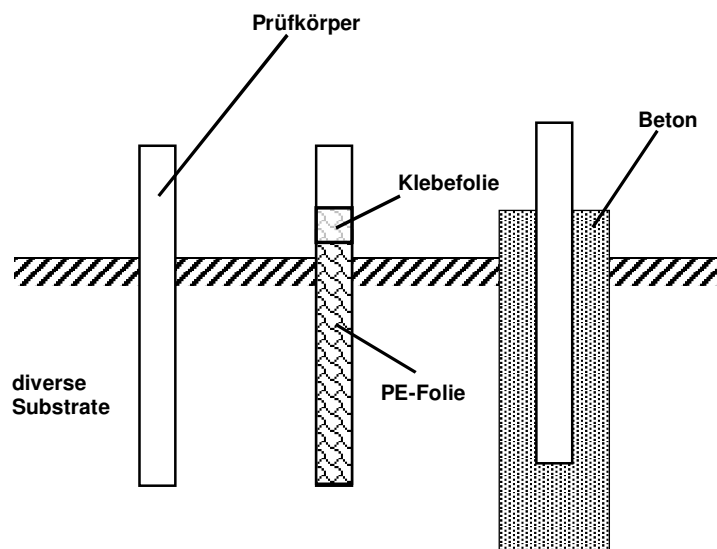


Abb. 6. Exposition von Prüfkörpern in unmodifiziertem und modifiziertem Kontakt mit verschiedenen Bodensubstraten.

Tab. 7. Beschreibung der verschiedenen Bodensubstrate.

Bodentyp	Beschreibung	Wasserhaltekapazität [%]	Prüfkörperanzahl
Testfeld-Boden	Mutterboden aus dem Erdkontakt-Testfeld der BFH in Hamburg-Lohbrügge	25,8	10 x Kiefernspiltholz 10 x Eichenkernholz 10 x Kiefernspiltholz in PE-Folie
Sand	Quarzsand; Korngröße: ca. 0,5-3,0 mm	8,8	10 x Kiefernspiltholz 10 x Eichenkernholz
Testfeld-Boden + Sand	Testfeld-Boden und Sand gemischt 50:50	18,5	10 x Kiefernspiltholz 10 x Eichenkernholz
Kompost	Kompost hergestellt an der BFH aus Gartenabfall (Laubstreu, Gras, Nadel- und Laubholzschnitt, Sand)	29,4	10 x Kiefernspiltholz 10 x Eichenkernholz 10 x Kiefernspiltholz in PE-Folie
Kies	Kies; Korngröße ca. 15-40 mm	- ^a	10 x Kiefernspiltholz 10 x Eichenkernholz
Testfeld-Boden + Dünger	Testfeld-Boden; 80 g/m ² Dünger jährlich eingebracht, Dünger enthält: 7% Stickstoff, 4% Phosphorpentoxid, 9% Kaliumoxid, 2% Magnesiumoxid, 7,8% Schwefel, 0,018% Zink	25,8	10 x Kiefernspiltholz 10 x Eichenkernholz
Beton	Prüfkörper auf 2/3 ihrer Länge einbetoniert (Portland-Zement) in Blocks von 14,0 cm Höhe und 6,5 cm Durchmesser	- ^a	10 x Kiefernspiltholz 10 x Eichenkernholz

PE = Polyethylen; ^anicht messbar

3.5 Molekularbiologische Identifizierung von Pilzen

Um Unterschiede hinsichtlich der sich an exponiertem Holz einstellenden Pilzflora und deren möglichen Einfluss auf die zu erwartende Gebrauchsdauer des Holzes zu untersuchen, wurden an acht verschiedenen der im Kapitel 3.2 beschriebenen Doppellagen-Testsets nach mehrjähriger Exposition Holzproben entnommen und molekularbiologisch auf das Auftreten verschiedener Pilzarten hin untersucht. Die Probennahme erfolgte an sechs bis elf Kiefernspiltholzprüfkörpern an den Standorten Feldberg, Sankt Märgen, Hinterzarten, Freiburg Sonne, Freiburg Schatten, Stuttgart Sonne, Stuttgart Schatten und Oberrottweil. Insgesamt wurden 76 Prüfkörper beprobt. Im Jahr 2003 wurden den Prüfkörpern mit einem Skalpell Oberflächen-Proben in Form eines Spans entnommen. In der oberen Prüfkörperlage wurden die Proben an den Prüfkörperkanten, in der unteren Lage mittig auf der Prüfkörperoberseite entnommen. Im Jahr 2004 wurden denselben Prüfkörpern Bohrspäne-Proben

aus dem Prüfkörperinnerem entnommen. Die Bohrspäne-Proben wurden an jeweils zwei Stellen eines Prüfkörpers entnommen und noch im Freiland zusammengefasst. Die genauen Entnahmestellen sind aus Abb. 7 ersichtlich.

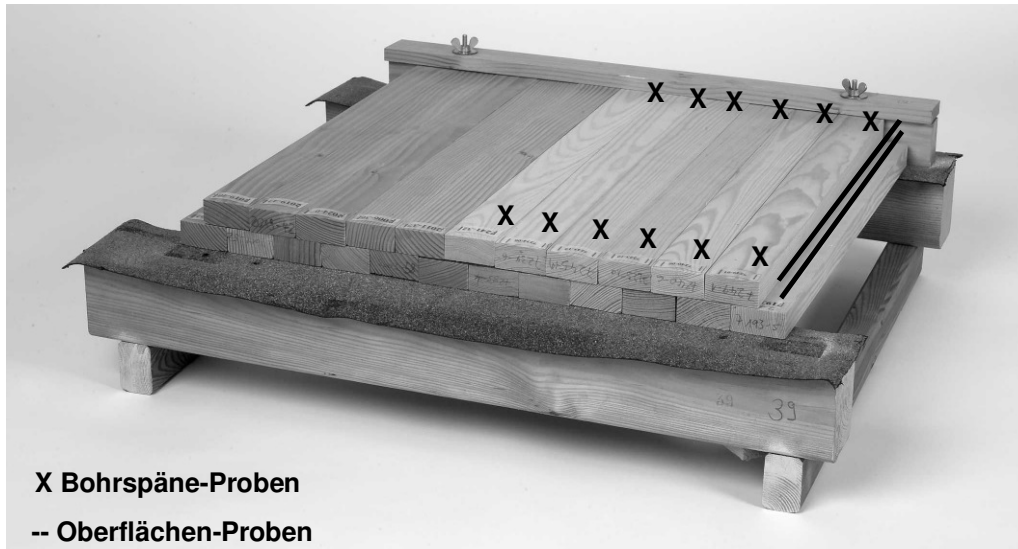


Abb. 7. Doppellagen-Testset mit Markierung der Entnahmestellen der Bohrspäne-Proben (X) und Oberflächen-Proben (--) für molekularbiologische Untersuchungen. In der oberen Lage wurden die Oberflächenproben an den Prüfkörperkanten, in der Unterlage mittig auf der Prüfkörperoberseite entnommen. Die Bohrspäne-Proben wurden an jeweils zwei Stellen eines Prüfkörpers entnommen und noch im Freiland zusammengefasst.

Die molekulare Identifizierung von holzerstörenden oder holzbewohnenden Pilzen wurde durch das Department of Wood Science und das Department of Forest Mycology and Pathology der Swedish University of Agricultural Sciences in Uppsala, Schweden durchgeführt. Die experimentelle Vorgehensweise ist in Publikation VI (7.6) detailliert beschrieben und lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Extraktion und PCR (Polymerase Chain Reaction)

Die Holzproben wurden zunächst mechanisch zerkleinert und anschließend mit einem 2%(m/V)-igem Cetyltrimethylammoniumbromid (CTAB) – Puffer versetzt. Zur Extraktion der DNS wurden die Proben für 60 min bei 65°C in einen Heizblock gegeben und alle 15 min durchmischt. Anschließend wurden die Proben für 15 min zentrifugiert, der Überstand unter Zugabe von 600 µl CTAB (2%) nochmals für 40 min im Heizblock belassen. Die DNS wurde mit Isopropanol ausgefällt, mit eiskaltem 70%igem Ethanol gewaschen und mit GeneClean® Turbo BIO 101® Systems nach Herstellerangaben gereinigt.

Die nrDNS-ITS Region wurde mit den Primern ITS 1F (CTT GGT CAT TTA GAG GAA GTA A) und ITS 4B (CAG GAG ACT TGT ACA CGG TCC AG) amplifiziert. Die verwendeten Primer wurden mit den fluoreszierenden WellRED Farbstoffen D3 und D2 (Proligo, Boulder, USA) markiert. Der PCR-Mastermix enthielt die Primer 2,0 mM dNTP, 25 mM MgCl₂ und RedTaq-Polymerase. Das PCR-Programm umfasste 35 Zyklen á 30 s bei 94°C zur Denaturierung der DNS, 30 s bei 50°C zum Annealing der Primer und 30 s bei 72°C für die Extensionsphase. Darüber hinaus gab es eine initiale Denaturierungsphase von 5 min bei 94°C und eine abschließende Extension von 7 min bei 72°C. Die PCR-Produkte wurden anschließend durch eine Gelelektrophorese mit 0,9% (m/V) Agarose-Gel aufgetrennt. Die DNS in dem Gel wurde nach Ethidiumbromid-Reagenzierung über UV-Licht sichtbar gemacht.

T-RFLP (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism) und Sequenzierung

Eine T-RFLP wurde mit allen Proben durchgeführt. Für den Aufschluss der PCR-Produkte durch Restriktionsenzyme wurden 5 µl der PCR-Produkte mit 5 µl einer Enzymmischung für ca. 12 h bei 37°C für *CfoI* und bei 65°C für *TaqI* inkubiert. Die Proben wurden anschließend mit einem Beckman CEQ TM 8000 Genetic Analysis System aufgetrennt.

Die Sequenzierung wurde vom Rudbeck Laboratory in Uppsala, Schweden, durchgeführt. Die Sequenzen wurden manuell aufbereitet und abgeglichen mit der Gen-Datenbank des National Center for Biotechnology Information (NCBI) in Bethesda, USA, und der Kultursammlung des Department of Wood Science in Uppsala.

Klonierung

Ein Teil der Proben wurde reamplifiziert, geklont, sequenziert und nochmals mittels T-RFLP analysiert, um jedes Fragment aus der vorangegangenen T-RFLP zu identifizieren. Die Klonierung wurde mit einem InvitrogenTM TOPO TA Cloning[®] Kit nach Herstellerangaben durchgeführt.

3.6 Holzfeuchteüberwachung (Monitoring) an Bauwerken

3.6.1 Holzfassade mit verschiedenen Dachüberständen in Taastrup, Dänemark

Ziel dieses Untersuchungsteiles war es, den Einfluss eines Dachüberstandes auf die Holzfeuchte und somit auf die für einen pilzlichen Holzabbau notwendigen Bedingungen innerhalb einer Fassade zu untersuchen. Zugleich sollte das in Kapitel 3.1 beschriebene Messsystem unter Gebrauchsbedingungen erprobt werden, um die in Freilandversuchen und durch in-situ-Messungen gewonnenen Daten abzugleichen. Hierzu wurden Holzfeuchtemessungen an einer Fassade (15 m lang, 2,5 m hoch) mit drei unterschiedlichen Dachüberständen (12 cm, 62 cm, 112 cm) auf dem Versuchsgelände des Danish Technological Institute (DTI) in Taastrup, Dänemark, (Abb. 8) durchgeführt. Die Fassade aus sägerauhen Fichtenbrettern ($1170 \times 105 \times 25 \text{ mm}^3$) war nach Norden ausgerichtet und als hinterlüftete Boden-Deckelschalung ausgeführt (Abb. 9). Ein oberer und ein unterer Teil der Fassade, beide mit einer Höhe von 117 cm, waren durch ein horizontal angebrachtes Brett, das als kleiner Dachüberstand von 4,5 cm Breite fungierte, voneinander getrennt. Der Abstand der Fassade zum Boden betrug 15 cm.

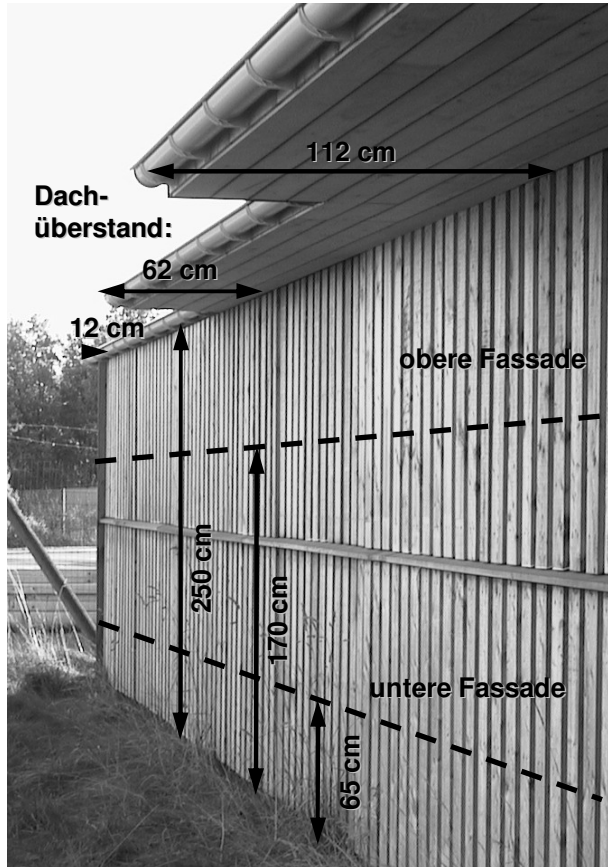


Abb. 8. Boden-Deckel-Schalung an einer Fassade mit unterschiedlichen Dachüberständen in Taastrup, Dänemark. Gestrichelte Linien markieren die Höhe der Messstellen an der oberen und unteren Fassade.

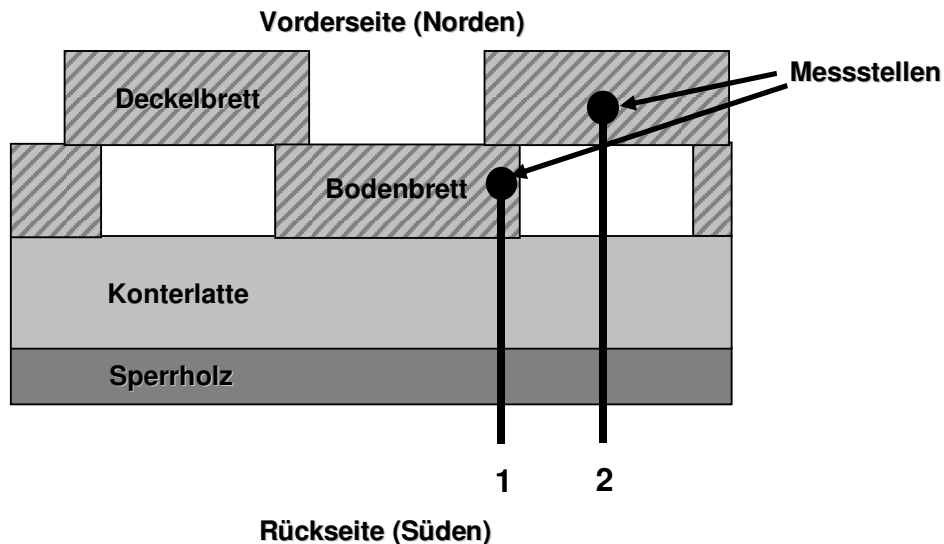


Abb. 9. Querschnitt der Fassade und schematische Darstellung der Messstellen. Messstelle 1 befindet sich in der Überlappungszone im Bodenbrett; Messstelle 2 befindet sich mittig im Deckelbrett.

Elektroden zur Holzfeuchtemessung (*cf.* Kapitel 3.1) wurden von der Rückseite der Fassade aus in zwei Höhen, 65 cm und 170 cm, eingeleimt. Insgesamt wurden 18 Elektrodenpaare angebracht, drei je Kombination aus Dachüberstand und Einbauhöhe, und mit Datenloggern verbunden.

3.6.2 Freitragende Holzbrücke in Essing, Bayern

Ziel dieses Untersuchungsteils war es, Langzeit-Holzfeuchtemessungen an einem Bauwerk im Gebrauch durchzuführen und die ermittelten Holzfeuchte-Daten mit den auftretenden Schäden durch holzerstörende Pilze zu korrelieren, um die aus Freilandversuchen stammenden Werte mit unter Realbedingungen ermittelten Werten abzugleichen. Ferner sollte die Eignung automatisierter Holzfeuchte-Langzeitmessungen (Monitoring) als Frühwarnsystem für feuchte-induzierte Befallsrisiken untersucht werden, wobei ein ungewöhnlicher, plötzlicher Anstieg der Holzfeuchte als Indikator für einen bevorstehenden Pilzbefall angenommen wurde.

Die Fußgängerbrücke in Essing ist eine freitragende Holzbrücke mit einer Gesamtlänge von 190 m, die den Main-Donau-Kanal überspannt (Abb. 10). Abgesehen vom Brückenbelag besteht die gesamte Konstruktion aus Fichten-Brettschichtholz, das chemisch durch einen nachträglichen Anstrich mit einer Holzschutzlasur und einer Wetterschutzlasur behandelt wurde. Die Brücke wurde 1987 erbaut. Ein erster Schaden an den Zugbändern der Brücke durch Braunfäulepilze wurde 1997 entdeckt und 1998 wurden Sanierungsarbeiten an den Zugbändern durchgeführt. Als konstruktive Schutzmaßnahme wurden die Randträgerflächen durch eine hinterlüftete Sperrholzbeplankung bekleidet. Nach einem zweiten Schaden durch holzerstörende Pilze, der im Bereich von als Verbindungsmittel dienenden Nagelplatten im unteren Teil der Brückenstützen auftrat, wurden das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messsystem zur Überwachung der Holzfeuchte (Holzfeuchte-Monitoring) an verschiedenen Bauteilen der Brücke installiert.

Aufgrund der besonderen Installationsbedingungen an der Essinger Brücke wurden die Messelektroden nicht direkt in das Holz eingeleimt, sondern mit einem organischen Schutzmittel imprägnierte Messdübel verwendet (*cf.* Kapitel 3.1). Die bereits im Vorwege mit Elektroden ausgestatteten Messdübel wurden

in vorgebohrte Löcher (Tiefe 70 mm, Durchmesser 13 mm) in die jeweiligen Brückenbauteile gepresst. Im Mai 2004 wurden insgesamt 64 Messdübel an der Brücke installiert. Hierbei sollten Unterschiede zwischen Wetterseite und Nicht-Wetterseite sowie der Einfluss von Nagelplatten in verschiedenen Einbauhöhen (Abb. 10, Markierungen ①, ② und ③) ermittelt werden. Weiterhin wurden Messdübel in den Zugbändern installiert, wo erste Schädigungen 1997 aufgetreten waren (Abb. 10, Markierung ④). Die Wirksamkeit der als Schutzmaßnahme angebrachten Sperrholzbekleidungen sollte überprüft werden. Während der jährlichen Inspektion der Brücke wurden die Datenlogger ausgelesen und das Holz im Bereich der Messstellen visuell hinsichtlich des Auftretens von Fäulnis bewertet.



Abb. 10. Freitragende Fußgängerbrücke in Essing, aus Fichten-Brettschichtholz: ① Untere Nagelplatten, ② Bereich oberhalb der unteren Nagelplatten, ③ obere Nagelplatten, ④ mit Sperrholz bekleidete Zugbänder.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Konzeption eines Modells zur Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holzbauteilen

Unter der Annahme, dass die Gebrauchsdauer von Holz durch eine Reihe von Dosis-Wirkungs-Beziehungen bestimmt wird, sollte der erste Schritt zu einem Gebrauchsdauervorhersage-Modell die Identifikation der wichtigsten Abbau-faktoren sein, deren Quantität in Form einer Dosis nachfolgend zu ermitteln ist. Als Ergebnis der Literaturübersicht im Kapitel 2.2 (*cf.* Publikation I, 7.1) lässt sich festhalten, dass eine sinnvolle Unterscheidung und Gliederung abbau-bestimmender Faktoren nach ihrem direkten oder indirekten Einfluss auf die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen erfolgen sollte: Die verschiedenen Faktoren haben einen direkten oder indirekten Effekt auf den Holzabbau, wobei die indirekten Faktoren die direkten bestimmen. Beispielsweise hat die Holzfeuchte einen direkten Einfluss auf die Gebrauchsdauer eines Holzbauteils, während der Dachüberstand eines Gebäudes keinen direkten Einfluss ausübt. In diesem Fall resultiert der indirekte Einfluss des Dachüberstandes aus einer geringeren Feuchtebelastung des Holzes durch Schlagregen. Klima und Konstruktion sind somit indirekte Faktoren. Neben den Material-inhärenten Eigenschaften des Holzes, sind Holzfeuchte, Holztemperatur und das Auftreten bestimmter Organismen die stärksten direkten Abbaufaktoren (Tab. 8).

Faktoren, die die Gebrauchsdauer von Holz direkt beeinflussen, lassen sich nochmals unterteilen in exogene Faktoren, die die von der jeweiligen Umgebung ausgehende Gefährdung charakterisieren, und endogene Faktoren, die die Fähigkeit des Materials, den von außen einwirkenden Beanspruchungen zu widerstehen, darstellen.

Tab. 8. Einteilung von abbaubestimmenden Faktoren.

Indirekte Faktoren	Direkte Faktoren	
	Exogene Faktoren (Umgebungsbedingungen)	Endogene Faktoren (material-inhärente Resistenz)
Klima	Auftreten bestimmter Organismen	Natürliche Resistenz
Lufttemperatur	Befallsdruck	Holzart
Niederschlag	Fäuletypen	Extraktstoffe
Wind	Abbaumechanismus	Position im Stamm
Luftfeuchte	Holztemperatur	juveniles/adultes Holz
Konstruktion	Dynamik der Holztemperatur	Reaktionsholz
Dimension	Holzfeuchte	Provenienz
Schatten	Dynamik der Holzfeuchte	Fällzeitpunkt
Bodenabstand	Nährstoffe	Lagerung, Trocknung, Dämpfen
Ausrichtung	Beziehungen zwischen Organismen	Dichte
Dachüberstand		Verthyllung
Erdkontakt		Technisch verbesserte Resistenz
Süßwasserkontakt		Schuttmitteltyp
Meerwasserkontakt		Schuttmittel-Aufnahme
		Schuttmittel-Eindringung
		Schuttmittel-Verteilung
		Holzmodifikation
		Hydrophobierung
		Beschichtung
		Biologischer Holzschutz

Die Einteilung von abbaubestimmenden Faktoren nach ISO 15686-1 (2000) erscheint in diesem Zusammenhang nur bedingt geeignet, da einige wichtige Faktoren (z.B. Meso- und Mikroklima) nicht ausreichend berücksichtigt werden und die Gewichtung anderer Faktoren (z.B. biotische Einflüsse) unverhältnismäßig gering ausfällt (*cf.* Kapitel 2.3.3).

Makro-, Meso- und Mikroklima haben nahezu keinen direkten Einfluss auf die Gebrauchsdauer von Holz, weil ihre Wirkung in Form mechanischer Agenzien gering ist. Ihr indirekter Einfluss auf Wachstum und Aktivität holzerstörender Organismen ist hingegen außerordentlich hoch, was aber durch die Faktormethode unberücksichtigt bleibt. Die Berücksichtigung der drei verschiedenen Klimaebenen wird durch ihre gegenseitige Beeinflussung erschwert. Einige grundlegende Regeln zur Implementierung klimatischer Einflüsse werden hier mit Bezug auf Holz als Baumaterial abgeleitet:

- Das Makroklima wird durch die Summe der langfristigen Wetterdaten des Standorts beschrieben (u.a. Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit).
- Das Mesoklima wird durch Einflüsse, die durch die Umgebungssituation am Standort hervorgerufen werden, beschrieben (u.a. Beschattung und Windschutz durch Bäume oder Gebäude).
- Das Mikroklima wird durch die Situation an und in der Konstruktion/dem Gebäude beschrieben (Bedingungen an der Bauteiloberfläche).
- Ein Vorhersagemodell sollte zunächst nur wenige und bevorzugt direkte Einflussfaktoren berücksichtigen. Da das Mikroklima u.a. das Resultat von Meso- und Makroklima ist, scheint es für viele Baustoffe (z.B. Kunststoff, Stahl) ein geeigneter Faktor zu sein (Gaylarde *et al.* 2003).
- Bei Holzbauteilen spielt der Abbau an der Oberfläche aber nur eine untergeordnete Rolle (z.B. durch Verfärbungen). Vielmehr hat das "Materialklima", das sich in Form von Holzfeuchte und Holztemperatur im Innern des Holzes einstellt, einen entscheidenden Einfluss auf den Abbau des Holzes und sollte für die Gebrauchsdauervorhersage von Holz zu allererst berücksichtigt werden.

Für die Konzeption eines Vorhersagemodells ergibt sich somit folgendes: Es ist ein mehrstufiger Ansatz zu wählen, in dessen erster Stufe die wichtigsten direkten Faktoren (Schlüsselfaktoren), z.B. Holzfeuchte und Holztemperatur, berücksichtigt werden. In nachfolgenden Stufen lassen sich dann weitere direkte Faktoren (z.B. Nährstoffangebot) und indirekte Faktoren in das Modell einbeziehen.

4.2 Methoden zur Quantifizierung der direkten Abbaufaktoren Holzfeuchte und Holztemperatur

Für die Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holz ist es unerlässlich, den Einfluss der verschiedenen direkten Abbaufaktoren (*cf.* Tab. 8) auf die Gebrauchsdauer von Holzbauteilen zu quantifizieren. Holzfeuchte und Holztemperatur, die gemeinsam das sich im Holz einstellende Materialklima bestimmen, wurden bereits als Schlüsselfaktoren erkannt und sollten deshalb in verschiedenen Untersuchungen (*cf.* Kapitel 4.3.3 bis 4.3.5 und 4.4) über

längere Zeiträume bestimmt und quantifiziert werden. Hierzu wurde das in Publikation II (7.2) beschriebene Messsystem entwickelt. Für Langzeitmessungen der Holzfeuchte wurden eingeleimte Elektroden in Verbindung mit Datenloggern eingesetzt und für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Holzarten kalibriert.

Durch vergleichende gravimetrische und elektrische Holzfeuchtemessungen wurden bei drei Kalibrierfeuchten ($u=15, 25$ und 50%) und drei Kalibrier-temperaturen ($T=4, 20$ und 36°C) Widerstandskennlinien ermittelt. Diese Kalibrierpunkte wurden aufgrund ihrer Bedeutung für die Praxis ausgewählt, wo Holzfeuchten unter 15% in bewitterten Anwendungen nicht zu erwarten sind und Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts sowie Holzfeuchten oberhalb 50% zu ungenauen und unplausiblen Widerstandswerten führen (Du *et al.* 1991, Smith *et al.* 2007). In Abb. 11 sind exemplarisch die Widerstandskennlinien für Fichte dargestellt (*cf.* weitere Kennlinien in Figure 7.2-5 und Figure 7.2-6). Der elektrische Widerstand unterschied sich bei gleicher Holzfeuchte sowohl zwischen den verschiedenen Holzarten als auch zwischen verschiedenen Temperaturen. Diese grundsätzliche Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Holzart und der Temperatur ist vielfach beschrieben (Lin 1967, James 1968, Du 1991, Du *et al.* 1991) und erfordert die Erstellung holzartenspezifischer Kennlinien.

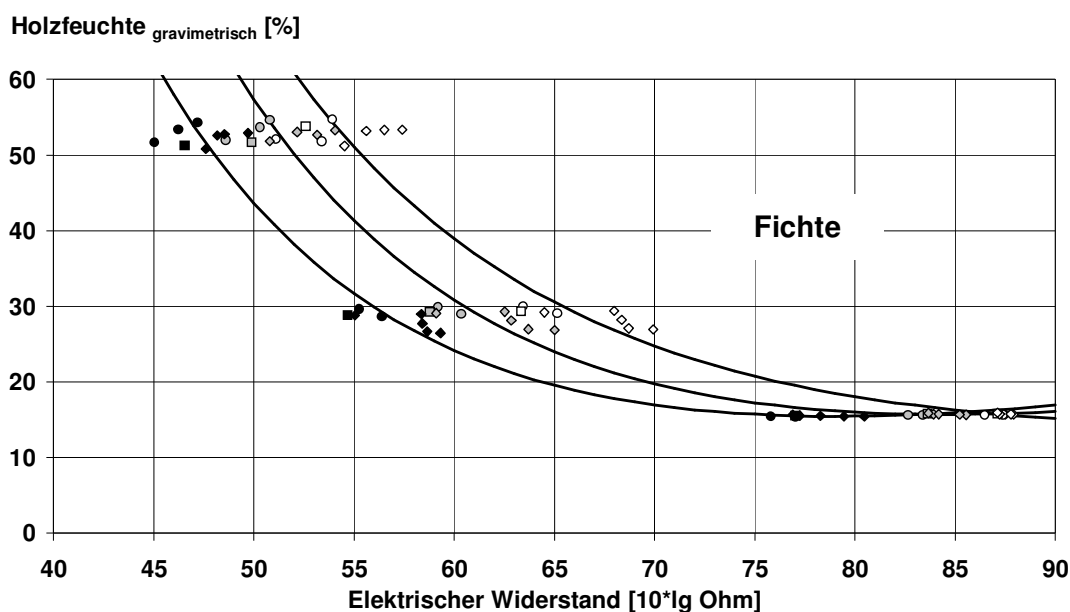


Abb. 11. Widerstandskennlinie für Fichte (○ = Provenienz 1, □ = Provenienz 2, ◇ = Provenienz 3, schwarz-gefüllt = 36°C , grau-gefüllt = 20°C , weiß-gefüllt = 4°C).

Aus Abb. 11 ist zu ersehen, dass der Verlauf der Kennlinien sich auch zwischen den drei unterschiedlichen Provenienzen unterscheidet. Die Berechnung der Holzfeuchte über den elektrischen Widerstand erfolgte deshalb getrennt für die verschiedenen Provenienzen und zusätzlich für alle Provenienzen gemeinsam. Hierzu wurde ein zweistufiger Ansatz gewählt: Zunächst wurden die Regressionsgleichungen (cf. Table 7.2-6), die über die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate ermittelt wurden, für die Berechnung der Holzfeuchte bei 20 °C ($u_{20^{\circ}\text{C}}$) herangezogen. In einem zweiten Schritt (Gleichung 3) wurde der Temperatureinfluss auf den elektrischen Widerstand berücksichtigt und die Holzfeuchte u_T um den Temperaturkompensationsfaktor C_T korrigiert.

Gleichung 3. Temperaturkompensation der gemessenen Holzfeuchte u_T

$$u_T = u_{20^{\circ}\text{C}} + C_T$$

u_T	Holzfeuchte bei der Temperatur T
$u_{20^{\circ}\text{C}}$	Holzfeuchte bei 20 °C
C_T	Temperaturkompensationskoeffizient

Unter der Annahme einer linearen Abhängigkeit zwischen $\lg R$ und der Temperatur, wie von Skaar (1964) beschrieben, wurde der Temperaturkompensationskoeffizient C_T wie folgt berechnet:

Gleichung 4. Berechnung des Temperaturkompensationskoeffizienten C_T

$$C_T = \frac{\Delta u}{\Delta T} = \frac{u_{36^{\circ}\text{C}} - u_{4^{\circ}\text{C}}}{36 - 4} [\% / ^{\circ}\text{C}]$$

Δu	Differenz der elektrisch ermittelten Holzfeuchte zwischen 4 und 36 °C
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen 4 und 36 °C

Der Einfluss der Temperatur auf die Widerstandsmessung unterschied sich zwischen den Holzarten und war abhängig von der Holzfeuchte. Deshalb wurden Temperaturkompensationsfaktoren getrennt nach Holzarten, Provenienz

und Holzfeuchte ermittelt (cf. Regressionsgleichungen in Table 7.2-7). Die so berechnete Holzfeuchte ist in Abb. 12 und Abb. 13 gegen die gravimetrisch bestimmte Holzfeuchte aufgetragen. Die berechneten und die durch Wägung bestimmten Holzfeuchtwerte stimmten wesentlich besser überein, wenn die verschiedenen Provenienzen getrennt berücksichtigt wurden (Abb. 13). Obwohl eine lineare Regression angenommen werden durfte, war das Konfidenzintervall der Einzelwerte nicht konstant, d.h. mit steigender Holzfeuchte stieg der maximale Fehler linear an. Die obere und untere Grenze des 99%-Konfidenzintervalls (Größtfehler) wurde deshalb graphisch ermittelt (cf. gestrichelte Linien in Abb. 12).

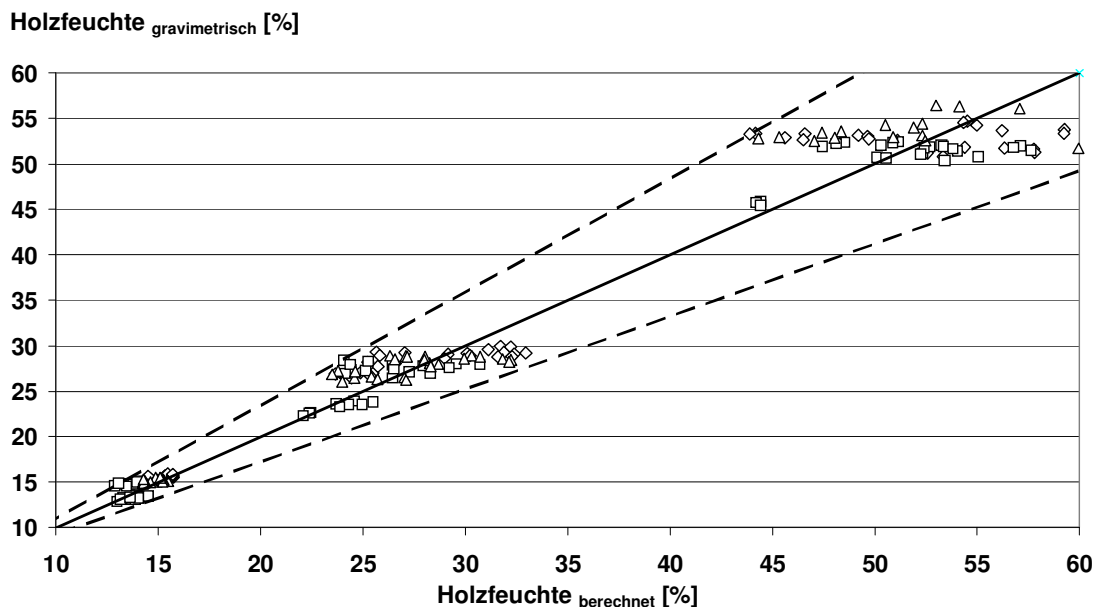


Abb. 12. Berechnete Holzfeuchte (nach Temperaturkompensation) im Vergleich zu gravimetrisch ermittelter Holzfeuchte. Zugrundeliegende Regressionen wurden für alle drei Provenienzen gemeinsam ermittelt (Δ = Kiefernspint, \square = Douglasie, \diamond = Fichte).

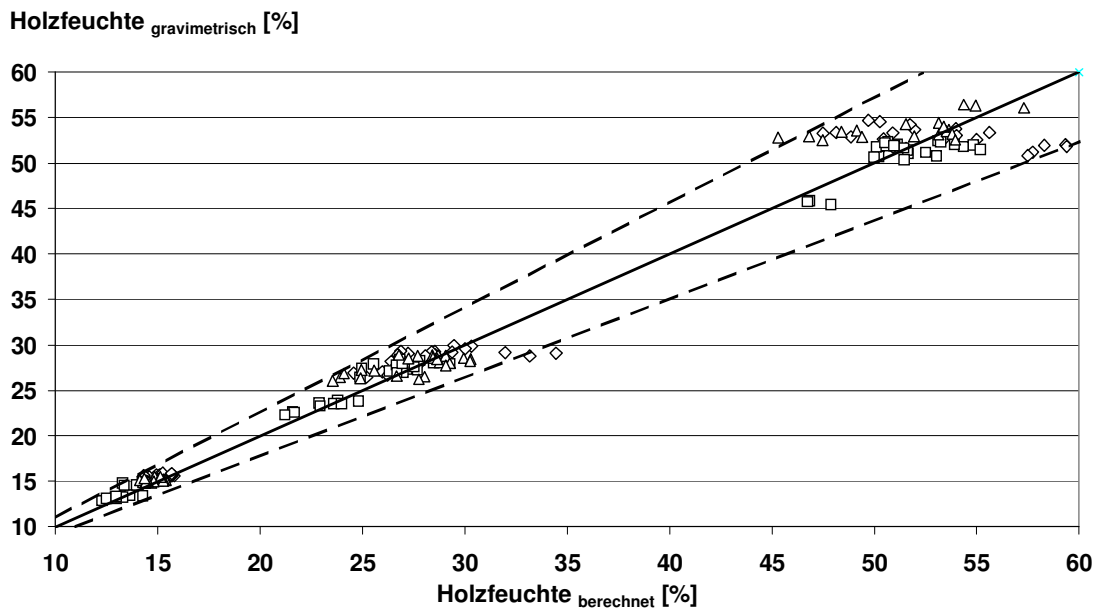


Abb. 13. Berechnete Holzfeuchte (nach Temperaturkompensation) im Vergleich zu gravimetrisch ermittelter Holzfeuchte. Zugrundeliegende Regressionen wurden für die verschiedenen Provenienzen getrennt ermittelt (Δ = Kiefernspint, \square = Douglasie, \diamond = Fichte).

Die Abweichungen des elektrischen Widerstandes zwischen den Prüfkörpern derselben Holzart und Herkunft lassen sich durch Unterschiede im Gehalt an akzessorischen Bestandteilen, der Dichte oder der anatomischer Struktur erklären (Lin 1967, Du 1991). Insgesamt hat die Fehlerabschätzung gezeigt, dass das eingesetzte Messsystem mit ausreichend hoher Genauigkeit angewendet werden kann, insbesondere wenn es um die Ermittlung von für die Pilzaktivität kritischen Holzfeuchten geht. Messungen oberhalb Fasersättigung führen zwar mit steigender Holzfeuchte zu immer ungenaueren Werten, geben jedoch innerhalb des Kalibrierbereichs eine Tendenz an (Smith *et al.* 2007). Für die Bestimmung eines Holzfeuchte-induzierten Befallsrisikos (*cf.* Publikation III, 7.3, IV, 7.4 und V, 7.5) ist letztlich die Zeit, während der eine Holzfeuchte oberhalb Fasersättigung vorliegt, entscheidend (u.a. Viitanen und Ritschkoff 1991, Rapp *et al.* 2000).

Das Messsystem wurde in Freilandversuchen an insgesamt 26 verschiedenen Standorten in Europa und den USA über einen Zeitraum von bis zu sieben Jahren und unter extremen Schwankungen von Holzfeuchte und Temperatur getestet. Hierbei wurde weder ein Ablösen noch sonstige Abnormalitäten an mehr als 540 Elektrodenpaaren beobachtet, vielmehr blieb die Verbindung

zwischen Klebstoff und Holz trotz des Witterungseinflusses und starken Holzfeuchteschwankungen verbunden mit Quell- und Schwindspannungen und auch nach Auftreten von starker Fäulnis stabil (Abb. 14). Alle täglich aufgezeichneten Widerstandswerte waren plausibel und zeigten nur geringe Abweichungen unter benachbarten Parallelen. Die Datenlogger sowohl für die Holzfeuchte- als auch für die Holztemperaturmessungen wurden wie ursprünglich berechnet und geplant fünf Jahre lang ohne Fehlmessungen mit nur einer Lithium-Thionylchlorid-Batterie je Test-Set betrieben.

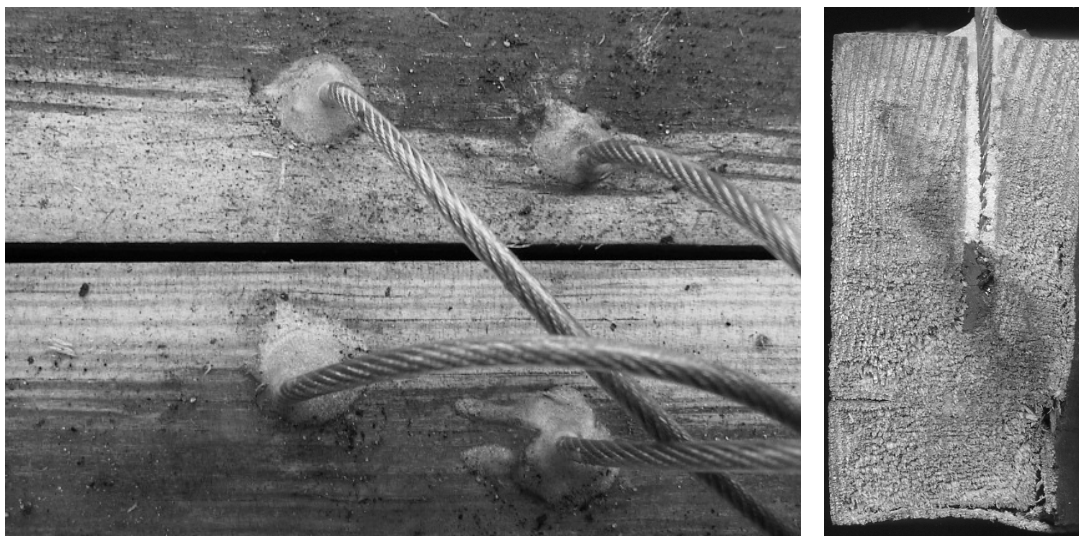


Abb. 14. Eingeleimte Elektroden in einem Kiefern-splint-Prüfkörper. Links: Nach sechs Jahren Exposition im Freiland. Rechts: Querschnitt durch eine eingeleimte Elektrode in stark durch einen Weißfäule verursachenden Pilz befallenem Holz nach vier Jahren Exposition.

Die Modifikation des Messsystems durch Einleimen von Elektroden in Messdübel und deren Installation an Bauwerken im Gebrauch erwies sich ebenfalls als praktikable Lösung. Wie in Publikation III (7.3) beschrieben, ließen sich mit Hilfe der Messdübel Langzeit-Holzfeuchtemessungen sowohl an schwer zugänglichen Bauteilen als auch an bereits durch Fäulepilze befallenem Holz durchführen.

4.3 Einfluss ausgewählter Abbaufaktoren

4.3.1 Standort und Verzögerungszeit

Die Bewertung der an verschiedenen Standorten ausgebrachten Doppellagenprüfkörper ergab eine hohe Variabilität des Abbaufortschritts zwischen

den Standorten, sowohl für Kiefernspiltholz (Abb. 15) als auch für Douglasienkernholz (Abb. 16). Der höchste Abbaufortschritt fand in Ljubljana statt, wo alle Kiefernspiltholz-Prüfkörper nach nur vier Jahren ausgefallen waren. Der geringste Abbau wurde in Uppsala ermittelt, wo erste Anzeichen von pilzlichem Abbau erst nach 3,3 Jahren entdeckt wurden. Es schienen mindestens zwei Aspekte verantwortlich für die hohe Variabilität zwischen den Standorten zu sein:

- Es waren unterschiedlich lange Zeitspannen, in denen nahezu kein Pilzbefall auftrat (Tab. 9), zu beobachten. Die mittleren Verzögerungszeiten (engl.: time lag) lagen zwischen 0,4 Jahren im Gewächshaus Winter und mehr als 3,8 Jahren in Uppsala. Die Zeit-Abbau-Kurven in Abb. 15 und Abb. 16 verdeutlichen darüber hinaus, dass der typisch sigmoide Verlauf von Abbaukurven, insbesondere bei Prüfungen außerhalb des Erdkontakts (Preston *et al.* 2000, Augusta 2007, Brischke *et al.* 2007), durch die Verzögerungszeit zu Beginn der Exposition bestimmt wird und sich damit wesentlich auf die vorherzusagende Gebrauchsdauer auswirken kann. Eine Vielzahl von Hemmnissen der Pilzaktivität kommt als Ursache solcher Abbauverzögerungen in Frage; einen Überblick gibt Tab. 10.
- Der Abbaufortschritt wird vorwiegend über Feuchte und Temperatur des Holzes, und somit auch durch die klimatischen Bedingungen vor Ort bestimmt. Darüber hinaus lässt sich eine gegenseitige Beeinflussung zwischen den anfänglichen Hemmungen und den sich einstellenden Feuchte- und Temperaturbedingungen nicht ausschließen.

Mittlere Abbaubewertung [0-4]

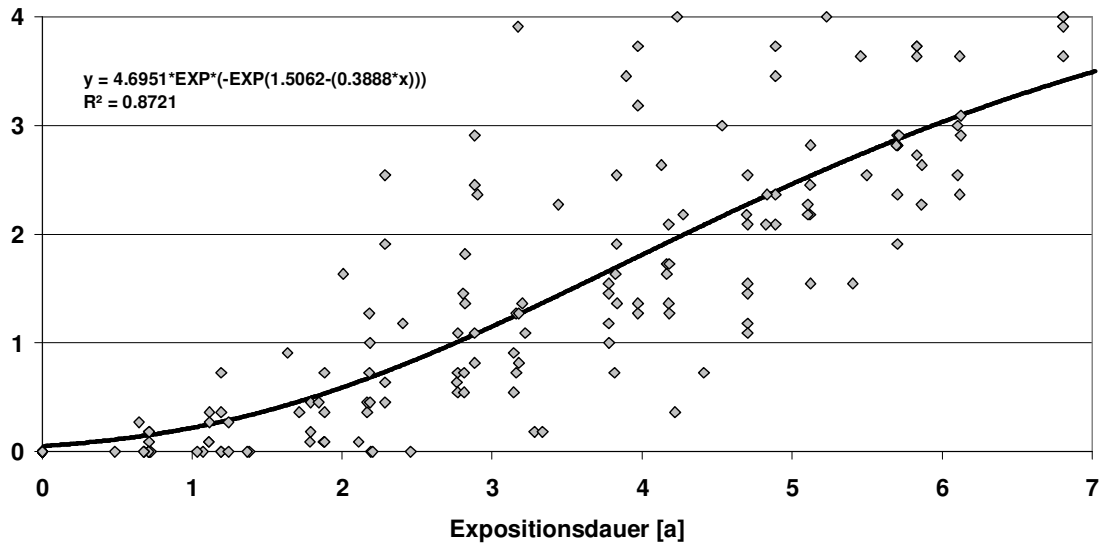


Abb. 15. Zusammenhang zwischen Expositionsdauer und mittlerer Abbaubewertung in Anlehnung an EN 252 (1990) von Kiefersplintprüfkörpern, exponiert in horizontaler Doppellage an 26 verschiedenen Standorten (jeder Punkt repräsentiert die mittlere Abbaubewertung von zwölf Prüfkörpern an einem Standort für eine bestimmte Expositionsdauer; schwarze Linie: Gompertz-Ausgleichsfunktion).

Mittlere Abbaubewertung [0-4]

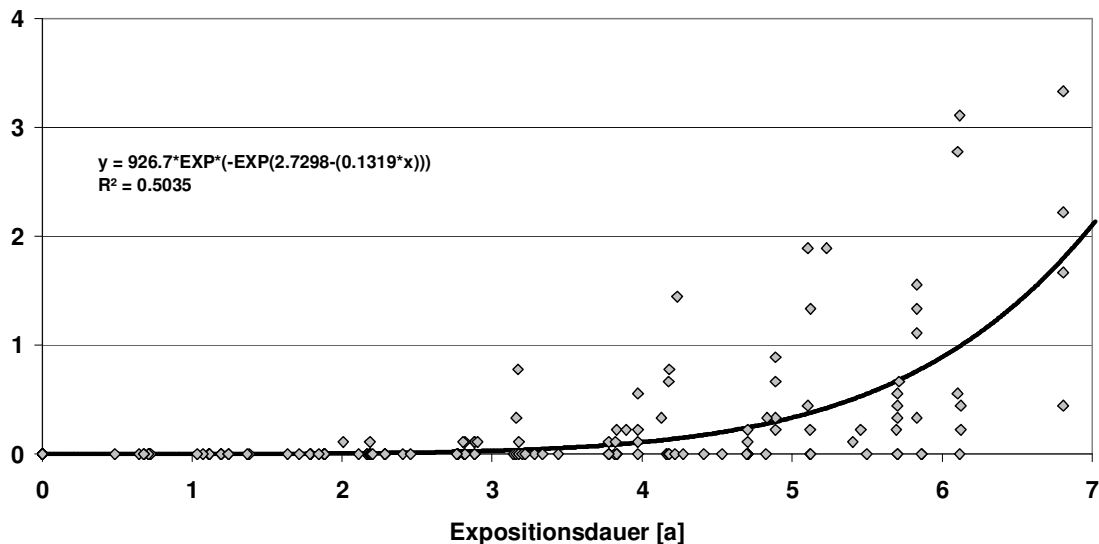


Abb. 16. Zusammenhang zwischen Expositionsdauer und mittlerer Abbaubewertung in Anlehnung an EN 252 (1990) von Douglasienprüfkörpern, exponiert in horizontaler Doppellage an 26 verschiedenen Standorten (jeder Punkt repräsentiert die mittlere Abbaubewertung von elf Prüfkörpern an einem Standort für ein bestimmtes Expositionsdauer; schwarze Linie: Gompertz-Ausgleichsfunktion).

Tab. 9. Mittlere Zeit bis zum sichtbaren Auftreten von Fäulnis (Verzögerungszeit); entspricht der mittleren Zeit bis zum Erreichen einer Abbaubewertung 1 (EN 252, 1990).

Standort und Art der Exposition	"Verzögerungszeit"	
	Mittlere Zeit bis zum Erreichen einer Abbaubewertung 1	
	[a]	
	Kiefernspint	Douglasie
Hamburg Sonne	2,2	4,3
Hamburg Schatten	1,7	4,8
Gewächshaus	0,9	> 4,7
Gewächshaus Winter	0,4	> 6,2
Reulbach Sonne	2,1	> 5,6
Reulbach Schatten	1,7	> 5,6
Stuttgart Sonne	1,8	> 6,1
Stuttgart Schatten	1,2	4,3
Freiburg Sonne	1,6	> 5,2
Freiburg Schatten	0,8	> 3,8
Oberrottweil	2,4	> 5,6
Feldberg	1,9	> 5,7
Bühlertal	1,2	> 4,7
Hornisgrinde	1,9	> 5,7
Hinterzarten	1,7	> 5,2
Schömburg	2,2	> 5,9
Heilbronn/Heidelberg	1,5	> 5,0
Dobel	2,5	> 5,9
St. Märgen	1,7	> 5,3
Uppsala	> 3,8	> 5,3
Ljubljana	1,3	> 3,6
Zagreb	1,5	> 3,6
London	> 3,7	> 4,2
Garston	2,1	> 3,9
Portsmouth	0,7	> 5,3
Ghent	2,4	> 4,3
Bordeaux	n.v.	n.v.

n.v. = nicht vorhanden

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Tab. 10. Mögliche Hemmwirkungen auf die pilzliche Aktivität als Ursache für eine Verzögerung des Holzabbaus durch holzerstörende Pilze.

Ursache	Wirkungsweise der Hemmung/Effekt	u.a. beschrieben von
Konkurrenz	Konkurrenz zwischen holzerstörenden und nicht-holzerstörenden Organismen um Nährstoffe oder Lebensräume	Rypáček (1966), Henningsson (1967), Rayner and Boddy (1988), Schmidt (2006)
Antagonismus	Hemmung von holzerstörenden Organismen durch nicht-holzerstörende Organismen, z.B. durch Abgabe toxischer Stoffwechselprodukte oder durch Mykoparasitismus	Jacquot (1967), Greaves (1970, 1972), Banerjee and Levy (1971), Rayner and Boddy (1988), Behrendt <i>et al.</i> (1995), Schmidt and Müller (1996), Holdenrieder and Greig (1998), Schmidt (2006)
hemmende Inhaltstoffe	Hemmung von pilzlichem Wachstum und Abbau durch (z.B. toxische) Inhaltstoffe, die durch Erstbesiedler inaktiviert oder aus dem Holz ausgewaschen werden können Hemmung der Sporenkeimung durch (z.B. toxische) Inhaltstoffe, die durch Erstbesiedler inaktiviert oder aus dem Holz ausgewaschen werden können	Findlay (1966), Arndt and Willeitner (1969), Martínez-Iñigo <i>et al.</i> (2000), Gref <i>et al.</i> (2001), Stirling and Morris (2006) Morton and French (1966), Baker <i>et al.</i> (1972), Schmidt and French (1979), Lee <i>et al.</i> (1992), Eberhardt <i>et al.</i> (1994), Augusta (2007)
Holzschutzmittel	Hemmung von pilzlichem Wachstum und Abbau; Detoxifizierung von Holzschutzmitteln durch Erstbesiedler oder Auswaschung	Detoxifizierung: Choi <i>et al.</i> (2003), Wallace and Dickinson (2004) Auswaschung: Greaves (1977), Leicester <i>et al.</i> (2005)
Unzureichende Permeabilität	Erhöhung der Permeabilität durch Besiedlung des Substrates mit Bläuepilzen oder Bakterien	Dunleavy and McQuire (1970), Liese (1970), Boutelje and Hägglund (1988), Fojutowski (2005)
Hydrophobie	Verringerung der hydrophoben Eigenschaften von schwer tränkbaaren, beschichteten oder Öl/Wachs-impregnierten Hölzern durch Bewitterung (UV, Auswaschung, Ausbluten)	Derbyshire and Carey (2001), Rapp <i>et al.</i> (2005), Stirling and Morris (2006)
Entfernung zu Infektionsquellen	Unterschiedlich hohe Konzentration von Sporen in der Luft	Vasiliauskas <i>et al.</i> (2005), Green <i>et al.</i> (2006), Kasprzyk and Worek (2006), Augusta (2007)
Kontakt mit Infektionsquellen	Unterschiedlich intensiver Kontakt zu Infektionsquellen, z.B. Mycel ¹⁾	Edlund (1998), Wakeling (2006), Augusta (2007)
Widrige Feuchtebedingungen	Mycelwachstum wird durch zu geringe Holzfeuchte eingeschränkt, während Sporenkeimung weniger durch Feuchtebedingungen beeinflusst wird	Morton and French (1966), Viitanen and Ritschkoff (1991), Viitanen (1997), Schmidt (2006)
UV	Hemmung der Sporenkeimung bei Mangel von Nischen, die Schutz vor UV-Licht bieten; Rissbildung kann die Schutzmöglichkeit von Sporen vor UV erhöhen	Panten <i>et al.</i> (1996), Schmidt (2006)

¹⁾beschleunigender Effekt

4.3.2 Makroklima

Das einen Standort bestimmende Makroklima hat zwar nur einen indirekten Einfluss auf potentielle Abbauvorgänge im Holz, lässt sich aber relativ einfach über Angaben meteorologischer Dienste ermitteln und wurde deshalb auch im Rahmen dieser Arbeit als mögliche Berechnungsgröße für die Vorhersage der Gebrauchsdauer untersucht (cf. Publikation V, 7.5). Der monatlich für die verschiedenen Standorte berechnete Scheffer Climate Index wurde exemplarisch für Kiefernspiltholz mit den zugehörigen Abbaubewertungen korreliert (Abb. 17). Eine mögliche Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen dem Klima-Index (= Dosis) und den zugehörigen Abbaubewertungen (= Wirkung), ließ sich aufgrund der extrem hohen Streuung nicht nachweisen. Die Ungenauigkeit des Scheffer Climate Index wurde u.a. bereits von De Groot (1982) und Norén (2001) herausgestellt: Zusätzliche Faktoren, wie z.B. mesoklimatische und mikroklimatische Unterschiede, bleiben durch den Index unberücksichtigt. Dies wird auch durch die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigt, besonders deutlich für die Exposition im Gewächshaus bzw. unter tropischen und subtropischen Bedingungen: Der Index war hier aufgrund täglicher Niederschläge und einer dauerhaft hohen Temperatur sehr hoch, während die Abbaugeschwindigkeit vergleichsweise gering ausfiel.

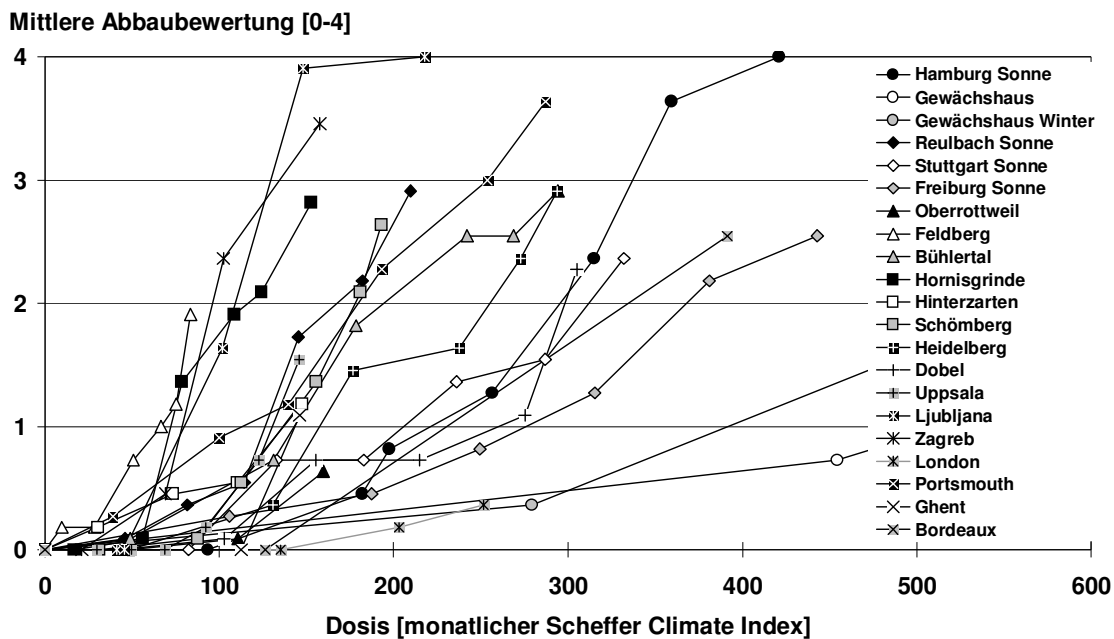


Abb. 17. Zusammenhang zwischen dem monatlich ermittelten Scheffer Climate Index und der mittleren Abbaubewertung in Anlehnung an EN 252 (1990) von Kiefern-splintprüfkörpern, exponiert in horizontaler Doppellage an verschiedenen Standorten.

Die genaue Abschätzung eines Gefährdungspotentials für einen bestimmten Standort mit Hilfe des Scheffer Climate Index erscheint somit bislang nicht möglich. Eine zufriedenstellende Korrelation ließ sich in der vorliegenden Untersuchung nicht erzielen, obwohl die Abbauwerte, wie von Beesley *et al.* (1983) empfohlen, auf die während der Expositionsperiode aufgetretenen Wetterbedingungen anstelle von langjährigen Mitteln (Scheffer 1971), bezogen wurden. Die ausschließliche Berücksichtigung von Niederschlag und Lufttemperatur für die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen scheint ein zu sehr vereinfachter Ansatz zu sein, weshalb im folgenden zusätzlich der Einfluss mikroklimatischer und letztlich materialklimatischer Bedingungen auf die Gebrauchsdauer des Holzes in die Betrachtungen einbezogen wurde.

4.3.3 Mikroklima

Im Rahmen der durchgeführten Doppellagen-Freilandversuche wurden an vier deutschen Standorten mit verschiedenen Expositionsarten (künstliche Beschattung, tropisches Gewächshaus) Holzfeuchte- und Holztemperaturmessungen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener mikroklimatischer Bedingungen auf das Materialklima und die Abbauprodukte zu ermitteln

(cf. Publikation IV, 7.4). Kiefern Splintholz wurde generell schneller abgebaut als Douglasienkernholz (Abb. 18a-e). Dennoch schritt in Stuttgart und Freiburg der Abbau an im Schatten exponierter Douglasie nach einer Verzögerung von zwei bis drei Jahren so schnell voran, dass es nach fünf bis sechs Jahren stärker abgebaut war als frei exponierte Kiefer (Abb. 18d, e).

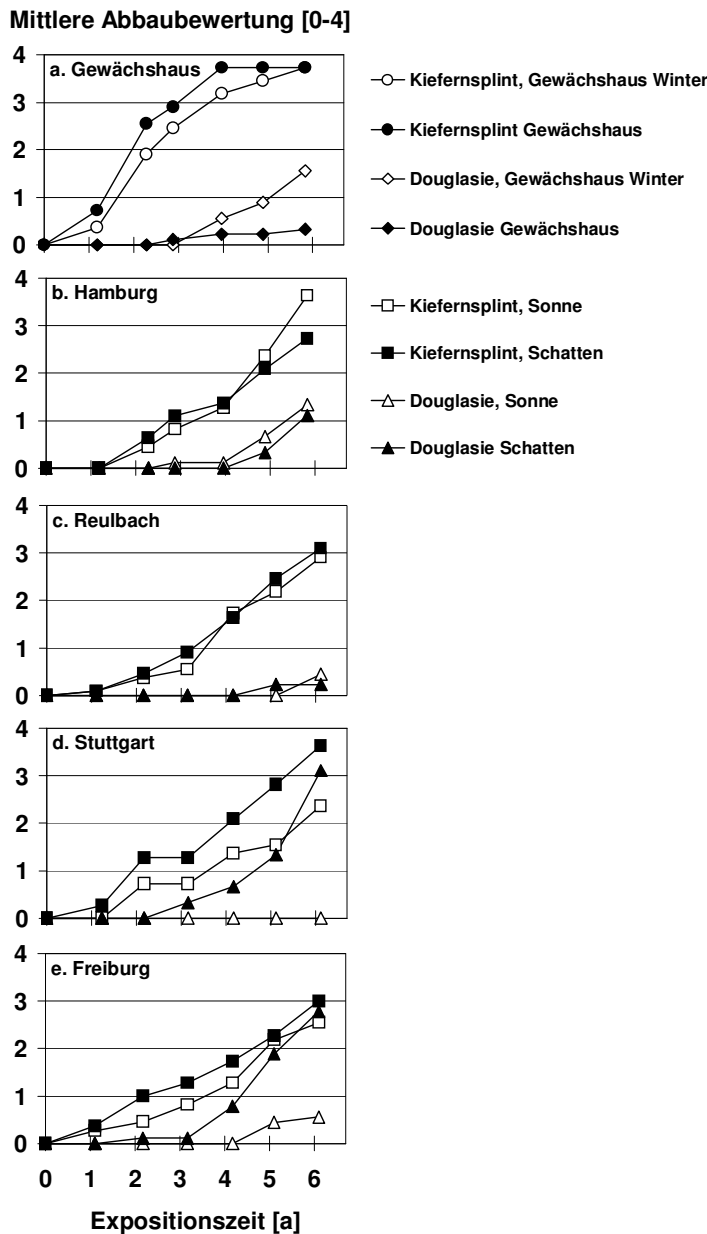


Abb. 18. Mittlere Abbaubewertung von Kiefern Splint- und Douglasienkernholz-Prüfkörpern in horizontaler Doppellage. Die Exposition in einem tropischen Gewächshaus (a) in Hamburg erfolgte für ein Testset ganzjährig, für ein weiteres Set zwischen 15. Oktober und 15. Mai (Winter). An den Standorten Hamburg (b), Reulbach (c), Stuttgart (d) und Freiburg (e) waren die Testsets frei (Sonne) und in Schattenboxen (Schatten) exponiert.

Die Verzögerungszeiten unterschieden sich zwischen den Standorten und teilweise auch zwischen den Expositionen Sonne und Schatten. Während Kiefernspint im Gewächshaus und an den Standorten Stuttgart und Freiburg bereits im ersten Jahr einen Pilzangriff aufwies, trat Pilzbefall in Hamburg und Reulbach nicht vor dem zweiten Jahr auf (Abb. 18a-e). Noch größere Unterschiede in Bezug auf den verzögerten Abbaubeginn ergaben sich für Douglasie: zwei Jahre in Stuttgart Schatten, aber sechs Jahre in Stuttgart Sonne (Abb. 18d). Mögliche Ursachen für eine anfängliche Hemmung der Pilzaktivität wurden bereits im vorhergehenden Kapitel 4.3.2 (Tab. 10) beschrieben.

Nach Überwindung der anfänglichen Hemmung war die Abbaugeschwindigkeit bei Kiefernspint an den verschiedenen Standorten und teilweise auch zwischen den Expositionen Sonne und Schatten nur gering unterschiedlich. Die Gewächshaus-Exposition stellte eine Ausnahme dar: Der Abbau war im Vergleich zu den anderen Standorten signifikant höher, vermutlich bedingt durch günstigere Feuchte- und Temperaturbedingungen, bzw. den Ausschluss der Nicht-Vegetationsperiode. Nach 2,3 Jahren war die Abbaubewertung im Gewächshaus 5-mal höher als in Hamburg Sonne. Ähnliche Verhältnisse im Abbau zwischen tropischen und mitteleuropäischen Standorten fanden Polman *et al.* (1991) in Eingrabeversuchen und Wong *et al.* (2004) in Lap-Joint-Versuchen. Erwartungsgemäß verringerten sich die Unterschiede mit zunehmender Expositionszeit bedingt durch die nach oben begrenzte Bewertungsskala nach EN 252 (1990).

Nominell lassen sich die Unterschiede in der Abbauentwicklung zwischen Standorten und Expositionsarten durch die Zeit angeben, die zum Erreichen einer bestimmten Abbaubewertung benötigt wurde (*cf.* Table 7.4-3): In der Regel schritt der Abbau im Gewächshaus (max. um den Faktor 2,4) und im Schatten (max. um den Faktor 1,9) schneller voran als bei frei exponierten Prüfkörpern (Sonne). Hierbei lag der Einfluss des Standorts (max. um den Faktor 1,7) in der gleichen Größenordnung wie der Einfluss der Schattenexposition. Mit zunehmender Abbauintensität verminderten sich beide Unterschiede, wie auch von Augusta (2007) und Brischke *et al.* (2007) berichtet wurde.

Die Holzfeuchte- und Holztemperaturverläufe von Kiefernspint und Douglasienkern sind in Publikation IV (7.4) für die verschiedenen Mikroklimata detailliert beschrieben. Im Folgenden sind die wichtigsten Beobachtungen hinsichtlich Temperatur und Holzfeuchte unter den verschiedenen mikroklimatischen Bedingungen zusammengefasst:

- Die Unterschiede in der Anzahl von Tagen oberhalb einer bestimmten Holzfeuchte (= feuchte Tage) zwischen Sonne und Schatten waren für Douglasienkern stärker ausgeprägt als für Kiefernspint.
- In der Regel war die Anzahl feuchter Tage im Schatten höher.
- Die Amplituden der Holzfeuchteverläufe waren in der Sonne höher.
- Generell korrelierte die Jahresdurchschnittstemperatur mit der Anzahl von Tagen ober- und unterhalb einer bestimmten Temperatur; sofern auch die Schatten-Sets berücksichtigt wurden, ergaben sich teilweise deutliche Unterschiede zwischen Standorten gleicher Jahresdurchschnittstemperatur.
- Tage mit extremen Bedingungen ($T > 25^{\circ}\text{C}$ oder $T < 0^{\circ}\text{C}$) hatten einen negativen Effekt auf die Pilzaktivität und traten im Schatten wesentlich seltener auf als bei freier Exposition (Sonne).

Für die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Funktionen zur Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holzbauteilen ließ sich Folgendes ableiten:

- Der Einfluss des Mikroklimas spiegelte sich in den Materialklima-Parametern Holzfeuchte und Holztemperatur wider.
- Unterschiede in Abbauintensität und –geschwindigkeit zwischen den Expositionen Schatten, Sonne und Gewächshaus ließen sich teilweise auf die unterschiedlich günstigen Bedingungen der verschiedenen Mikroklimata zurückführen.
- Neben der durch das Materialklima beeinflussten Abbauentwicklung hatte die anfängliche Hemmung der Pilzaktivität einen maßgeblichen Einfluss auf die Gebrauchsdauer der Prüfkörper.
- Teilweise stellten sich gravierend unterschiedliche Mikroklimata an demselben Standort ein (z.B. durch Abschwächung von Extremwerten), weshalb die Bestimmung eines Gefährdungspotentials nur anhand von Wetterdaten unzureichend erscheint.

- Die Anzahl kritischer Tage in Bezug auf Holzfeuchte und –temperatur scheint ein geeignetes Maß für die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen zu sein.
- Da die beiden Materialklima-Parameter Holzfeuchte und Holztemperatur in Wechselwirkung zueinander stehen, kommt nur eine gemeinsame Betrachtung für die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen in Frage.

Im nachfolgenden Kapitel 4.3.4 wird die unter Berücksichtigung der hier getroffenen Aussagen durchgeführte Erstellung von Dosis-Wirkungs-Funktionen auf Basis von Tageswerten der Materialklimaparameter Holzfeuchte und Holztemperatur beschrieben.

4.3.4 Materialklima

Tageswerte von Holzfeuchte und Holztemperatur wurden zur Abschätzung einer Tagesdosis in Form eines Gefährdungspotentials aufgenommen. Hierzu wurde angenommen, dass die Gesamt-Tagesdosis d , die auf das Holz einwirkt, das Produkt aus einer Holzfeuchte-induzierten Komponente d_u und einer Temperatur-induzierten Komponente d_T ist (Gleichung 5).

Gleichung 5. Berechnung der Gesamt-Tagesdosis

$$d = d_u \cdot d_T$$

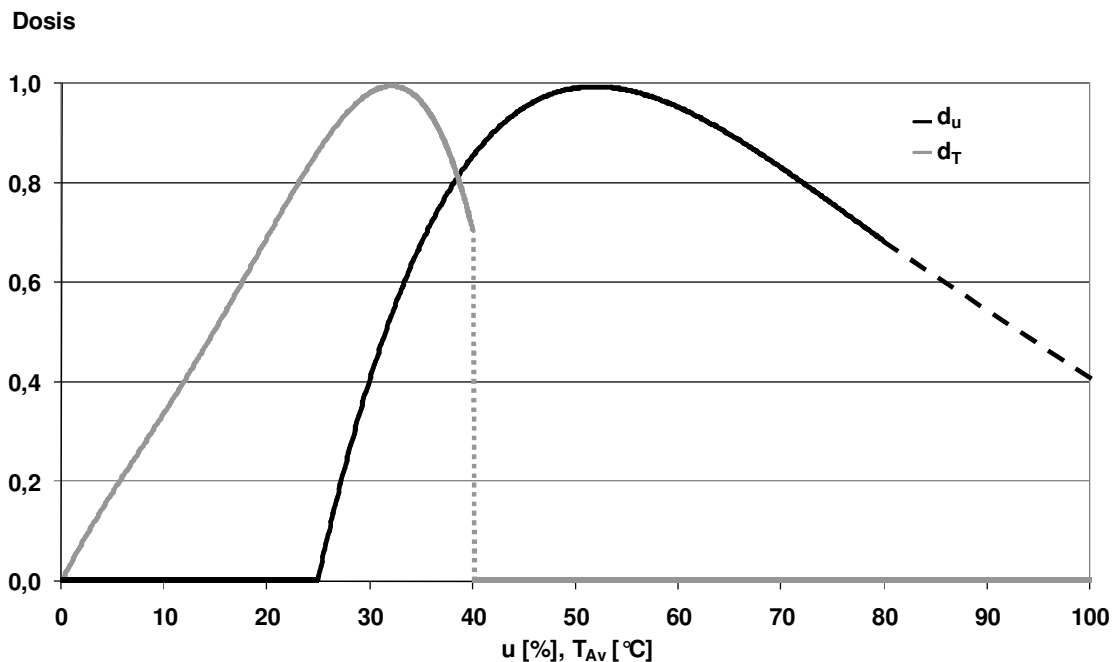


Abb. 19. Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte u und der Feuchte-induzierten Tages-Dosis d_u , und zwischen der Tagesdurchschnittstemperatur T_{Av} und der Temperatur-induzierten Tages-Dosis d_T . Gestrichelte schwarze Kurve: $u > 80\%$ trat nicht auf, der Kurvenverlauf ist deshalb nicht gesichert.

Ausgehend von Literaturwerten (*cf.* Kapitel 2.2.5.5 und 2.2.5.6) wurden Kardinalwerte beider Parameter ausgewählt, um eine polynomische Basisfunktion für beide Dosis-Komponenten aufzustellen (Abb. 19): Aufgrund der Vielzahl von möglicherweise im Freiland auftretenden Pilzarten, ließen sich eher Kardinalbereiche als exakte Kardinalpunkte für Holzfeuchte und Holztemperatur finden, deshalb wurden die Mittelwerte der in der Literatur beschriebenen Kardinalwerte verwendet. Minima und Maxima wurden als Dosis=0 gesetzt, die Optima als Dosis=1. Weiterhin wurde mit Bezug auf die Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur-Regel ein annähernd linearer Verlauf zwischen Temperaturminimum und -optimum angenommen (Schmidt 2006). In diesem Bereich wird die Enzymaktivität zwei- bis viermal höher bei einer Temperaturerhöhung um 10°C.

Die Gesamt-Tagesdosis wurde kumuliert und mit den zugehörigen Abbaubewertungen für die verschiedenen Expositionsintervalle und Standorte korreliert. Der sigmoide Verlauf der Dosis-Wirkungs-Beziehung wurde durch eine Gompertz-Ausgleichsfunktion dargestellt, die durch NLIN aus SAS[®] erstellt wurde (*cf.* Abb. 20). Die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate wurde

auf die Dosis-Wirkungs-Funktionen angewendet, um alle Variablen der polynomischen Dosis-Komponenten-Funktionen (d_u , Gleichung 6 und d_T , Gleichung 7) mit MS Excel Solver zu optimieren. Folgende Nebenbedingungen wurden aufgestellt: Die Gesamt-Dosis von Tagen mit einer Maximaltemperatur über 40 °C, mit einer Minimaltemperatur unter -1 °C oder einer Holzfeuchte unter 25% wurden gleich null gesetzt. Die computergestützte Optimierung ergab folgende Polynome für die in Abb. 19 dargestellten Dosis-Komponenten:

Gleichung 6. Funktion der Holzfeuchte-induzierten Tagesdosis-Komponente

$$d_u = 6,75 \cdot 10^{-10} u^5 - 3,50 \cdot 10^{-7} u^4 + 7,18 \cdot 10^{-5} u^3 - 7,22 \cdot 10^{-3} u^2 + 0,34u - 4,98$$

; wenn $u \geq 25\%$

d_u = Holzfeuchte-induzierte Tagesdosis-Komponente

u = Holzfeuchte

Gleichung 7. Funktion der Holztemperatur-induzierten Tagesdosis-Komponente

$$d_T = 1,8 \cdot 10^{-6} T^4 + 9,57 \cdot 10^{-5} T^3 - 1,55 \cdot 10^{-3} T^2 + 4,17 \cdot 10^{-2} T$$

; wenn $T_{min} > -1$ °C und $T_{max} < 40$ °C

d_T = Holztemperatur-induzierte Tagesdosis-Komponente

T = durchschnittliche Tages-Holztemperatur

T_{min} = minimale Tages-Holztemperatur

T_{max} = maximale Tages-Holztemperatur

Da Braunfäulepilze in der Regel geringere Ansprüche an die Holzfeuchte haben als Weiß- und Moderfäuleerreger (Viitanen 1997, Schmidt 2006), erschien es sinnvoll, eine nach Braunfäule und Weiß-/Moderfäule getrennte Berechnung von Dosis-Wirkungs-Funktionen vorzunehmen. Daten über einen durch Braunfäule verursachten Holzabbau lagen bisher nur von einem Standort (Ljubljana) vor, während Weiß- und Moderfäule an Kiefernspiltholz an 26 Standorten vorherrschend waren. In Abb. 20 ist die Dosis-Wirkungs-Funktion für diese Kombination dargestellt. Die Holzfeuchte- und Holztemperatur-induzierte Dosis korrelierte eng mit den zugehörigen als Wirkung verstandenen Abbaubewertungen für Kiefernspiltholz ($R^2=0,9389$).

Mittlere Abbaubewertung [0-4]

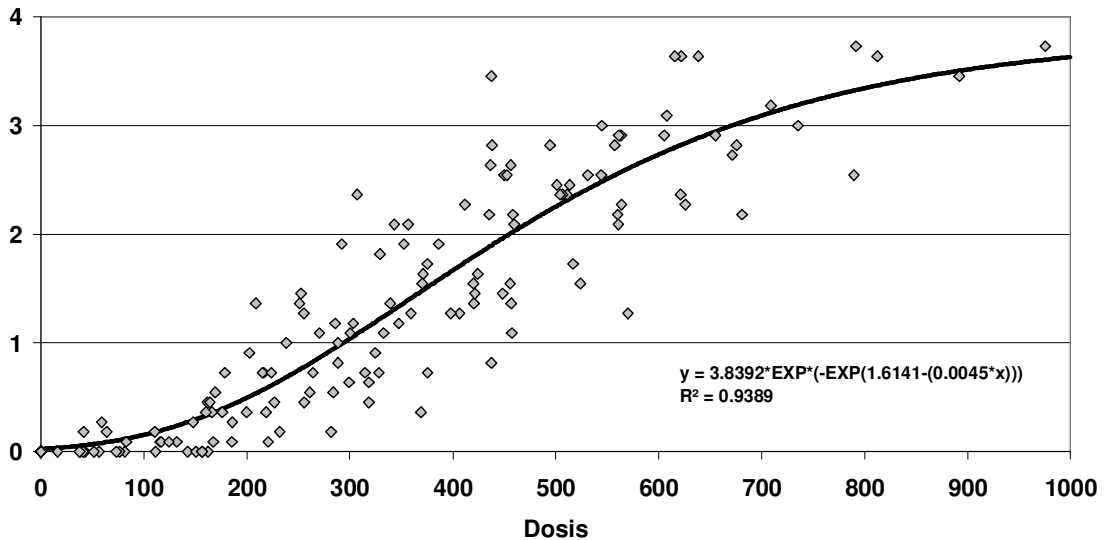


Abb. 20. Zusammenhang zwischen Dosis und mittlerer Abbaubewertung in Anlehnung an EN 252 (1990) von Kiefernspintprüfkörpern, exponiert in horizontaler Doppellage an 26 verschiedenen Standorten (jeder Punkt repräsentiert die mittlere Abbaubewertung an einem Standort für ein bestimmtes Expositionsintervall; schwarze Linie: Gompertz-Ausgleichsfunktion).

Generell werden zwei unterschiedliche Holzarten auch unterschiedlich auf die gleichen Klimabedingungen in Bezug auf ihre Holzfeuchte reagieren: Im Fall der horizontalen Doppellage lag die Holzfeuchte von Kiefernspint nahezu ständig über Fasersättigung. Im Gegensatz hierzu blieb das Douglasienkernholz ständig trockener als Kiefer und lag während der Sommerperiode unterhalb Fasersättigung. Folglich, wäre eine Bestimmung der Dosis nur auf Basis mikroklimatischer Daten nicht ausreichend, weil auch das Substrat Holz selbst hinsichtlich seiner Feuchtwechseleigenschaften berücksichtigt werden muss, die wiederum von akzessorischen Bestandteilen und der Struktur des Holzes bestimmt werden (u.a. EN 335-2 2006, Rapp *et al.* 2000, Stirling und Morris 2006). Ein direkter Zusammenhang ergibt sich offensichtlich nur zwischen dem Materialklima und pilzlichem Holzabbau.

4.3.5 Dachüberstand

Das Materialklima (*cf.* Kapitel 4.3.2), das sich in einem Holzbauteil einstellt, wird unter anderem durch verschiedene Konstruktionsdetails beeinflusst. Konstruktive Holzschutzmaßnahmen zielen deshalb häufig darauf ab, eine

länger anhaltende Befeuchtung des Holzes zu verhindern (z.B. Wetterschutz, Spritzwasserschutz, Tauwasserschutz). Für die Abschätzung der Gebrauchsdauer eines Holzbauteils ist es somit auch notwendig, den Einfluss solcher Konstruktionsdetails auf die direkten Abbaufaktoren (z.B. Holzfeuchte) zu ermitteln. Exemplarisch ist im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss verschiedener Dachüberstände auf die Feuchtebedingungen innerhalb einer Holzfassade in Taastrup (Dänemark) untersucht worden.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und dort an der Fassade installierte System zur automatisierten Holzfeuchtemessung lieferte über einen Zeitraum von drei Jahren plausible Messwerte. Die Holzfeuchte lag über ein gesamtes Jahr gesehen zwischen 15 und 30%. Holzfeuchten über 25%, die als kritisch für den Befall durch holzerstörende Pilze anzusehen sind (Schmidt 2006), traten dabei nur zwischen November und März auf, so dass aufgrund der geringen Temperaturen während dieser Zeit nur von einem sehr geringen Befallsrisiko auszugehen war.

Die Anzahl "feuchter Tage" unterschied sich signifikant zwischen den verschiedenen Messpunkten der Fassade. Die Anzahl von Tagen mit einer Holzfeuchte über 20, 23, 25, 27 und 30% während des gesamten Untersuchungszeitraumes ist Tab. 11 und Tab. 12 zu entnehmen. Der deutlichste Unterschied ergab sich für Tage oberhalb der kritischen Holzfeuchte von 25%. Die signifikant geringere Anzahl feuchter Tage in der oberen im Vergleich zur unteren Fassade hing stark vom jeweiligen Dachüberstand ab (Tab. 11). Je größer der Dachüberstand war, desto größer war auch die Differenz zwischen den beiden Fassadenteilen, so dass bei einem Dachüberstand von 112 cm die obere Fassade 56 feuchte Tage ($u > 25\%$), die untere hingegen 252 feuchte Tage aufwies (Faktor 4,5). Bei einem Dachüberstand von 62 cm unterschieden sich die beiden Fassadenbereiche nur noch um den Faktor 1,5; bei 12 cm Dachüberstand gab es keine signifikanten Unterschiede. Im Allgemeinen waren die Unterschiede in der Anzahl feuchter Tage größer zwischen 112 und 62 cm Dachüberstand als zwischen 62 und 12 cm.

Tab. 11. Tage mit einer Holzfeuchte $u > 20, 23, 25, 27$ und 30% für verschiedene Dachüberstände im oberen und unteren Teil der Fassade (gesamtes Expositionsintervall: 1145 Tage).

Dachüberstand	Fassade	Tage mit Holzfeuchte $u >$				
		20%	23%	25%	27%	30%
112 cm	oben	456	263	56	2	0
	unten	608	447	252	34	0
62 cm	oben	526	373	194	30	0
	unten	557	416	286	81	0
12 cm	oben	550	425	304	119	5
	unten	555	444	299	103	3

Tab. 12. Tage mit einer Holzfeuchte $u > 20, 23, 25, 27$ und 30% für Boden- und Deckelbretter im oberen und unteren Teil der Fassade (gesamtes Expositionsintervall: 1145 Tage).

Fassade	Bauteil	Tage mit Holzfeuchte $u >$				
		20%	23%	25%	27%	30%
oben	Bodenbrett	516	362	165	22	0
	Deckelbrett	517	367	182	35	0
unten	Bodenbrett	559	409	253	47	0
	Deckelbrett	567	429	289	81	0

Die Anzahl "feuchter Tage" unterschied sich ebenfalls signifikant zwischen den Bodenbrettern (z.B. 165 Tage über $u = 25\%$ in der oberen Fassade) und den Deckelbrettern (182 Tage) der Fassade (Faktor 1,1; Tab. 12), obwohl die Messelektroden in den Bodenbrettern im Bereich der Überlappung durch die Deckelbretter installiert wurden und hier eine behinderte Austrocknung zu erwarten war.

Die Gebrauchsdauer einer Holzfassade, die eine typische Anwendung innerhalb der weitgefassten Gebrauchsklasse 3 (EN 335-1, 2006) darstellt, wird durch eine Reihe verschiedener Faktoren beeinflusst. So werden Holzfeuchte- und Temperaturbedingungen an einer Fassade maßgeblich vom jeweiligen Mikroklima und somit u.a. von Beschattung, Ausrichtung, Bodenabstand, Dachüberstand, Art der Hinterlüftung bestimmt (Böttcher 1975, Willeitner und Schwab 1981, Trübswetter 2000, Pöhlmann 2001, Nore *et al.* 2005, Sahal und Lacasse 2005).

Wie die Holzfeuchtemessungen an der Fassade in Taastrup gezeigt haben, lässt sich der Einfluss einzelner indirekter Abbaufaktoren (hier: Dachüberstand) auf bestimmte direkte Abbaufaktoren (hier: Holzfeuchte) mittels Faktoren

quantifizieren. Im Gegensatz wären für eine Quantifizierung solch indirekter Faktoren mit der letztlich hervorgerufenen Wirkung, d.h. dem auftretenden Pilzbefall, sehr lange Versuchsdauern notwendig (Brischke und Rapp 2005b, cf. Kapitel 4.5.4).

4.3.6 Bodensubstrat

Der Einfluss verschiedener Bodensubstrate und unterschiedlicher Modifikationen des Holz-Boden-Kontaktes auf die Gebrauchsdauer von Kiefernspint- und Eichenkernholz wurde in einem Mini-Stake-Eingrabeversuch ermittelt. Nach drei Jahren Expositionsdauer ergaben sich für beide Holzarten signifikant unterschiedliche Abbauraten in den verschiedenen Bodensubstraten (Abb. 21 und Abb. 22). Die höchsten Werte ergaben sich für Eiche im Testfeldboden mit Dünger (Bewertung 3,8) gefolgt von Kompost (3,4); der geringste Abbau ergab sich für die Exposition in reinem Sand (1,4). Für Kiefer wurde die höchste Abbaubewertung im Kompost (3,4) gefolgt von Testfeldboden mit Dünger (2,8) erreicht; die geringste Bewertung ergab sich für die einbetonierten Prüfkörper (1,1). Über die hohe Abbauaktivität von Kompostböden berichteten auch Mieß (1997), Edlund (1998) und Li *et al.* (2007). Die Erhöhung der Abbauaktivität eines Bodens durch Düngung ließe sich aus der begrenzten Verfügbarkeit einiger Nährstoffe für holzerstörende Pilze im Boden erklären. Insbesondere Stickstoff kann zu einem limitierenden Faktor für Pilze werden (Rayner und Boddy 1988, Schmidt 2006). Der Effekt von Stickstoffzugaben auf die Abbauraten im Boden ist bislang jedoch nicht vollständig geklärt und hängt von der Verwertbarkeit des Stickstoffs für den Pilz ab (Hobbie 2005).

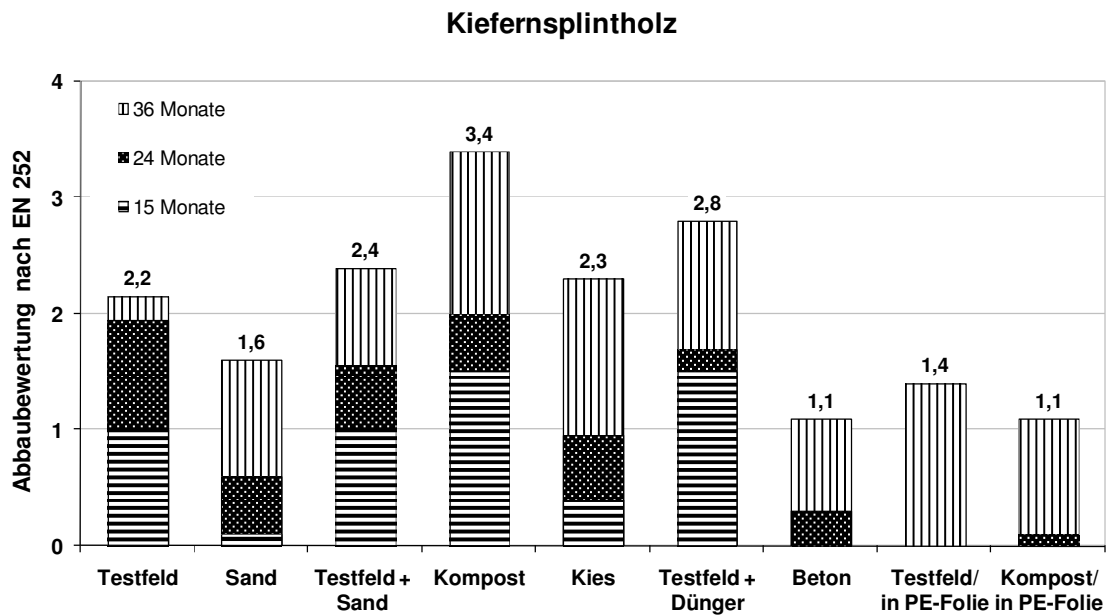


Abb. 21. Abbaubewertung von Kiefernspiltholz-Prüfkörpern nach drei Jahren Exposition in verschiedenen Substraten und verschiedenen Modifikationen des Holz-Boden-Kontaktes nach EN 252 (1990): 0 = kein Angriff, 1 = leichter Angriff, 2 = mittlerer Angriff, 3 = starker Angriff, 4 = Ausfall.

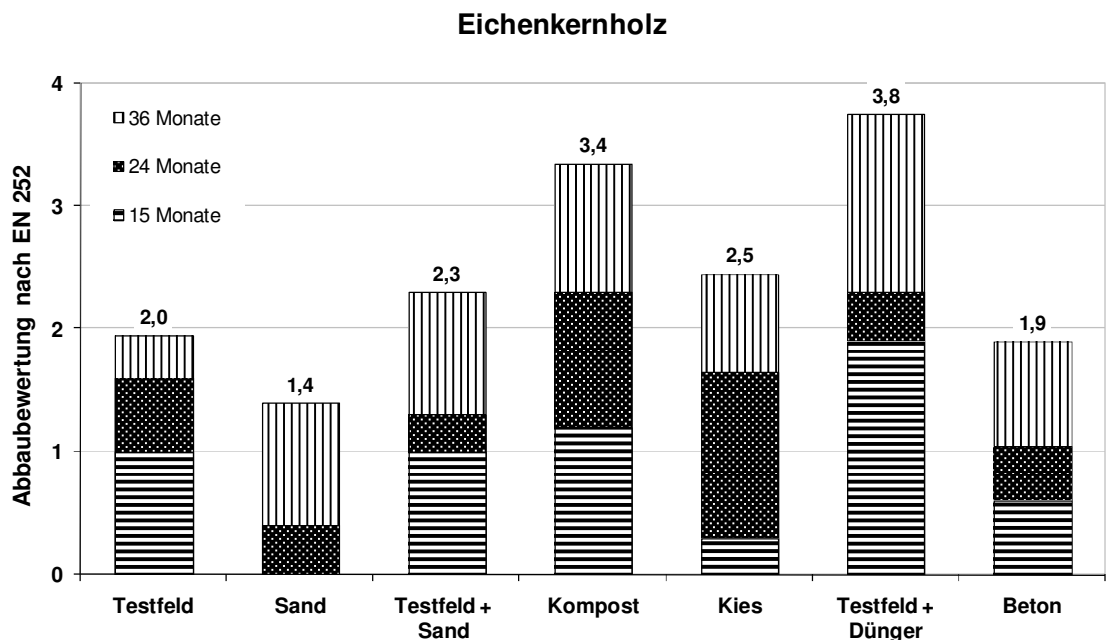


Abb. 22. Abbaubewertung von Eichenkernholz-Prüfkörpern nach drei Jahren Exposition in verschiedenen Substraten und verschiedenen Modifikationen des Holz-Boden-Kontaktes nach EN 252 (1990): 0 = kein Angriff, 1 = leichter Angriff, 2 = mittlerer Angriff, 3 = starker Angriff, 4 = Ausfall.

Für beide Holzarten war der Abbau im Testfeldboden ohne Zusatz und im Testfeldboden mit Sand ähnlich und kein signifikanter Einfluss der Sandzugabe festzustellen. Im Vergleich zu reinem Sand war in allen Testfeldboden enthaltenden Substraten eine höhere Abbauaktivität zu beobachten, wobei nach dem zweiten Expositionsjahr die Unterschiede sich nicht weiter verstärkten. Es bleibt somit abzuwarten, ob sich die besseren Ergebnisse der Prüfkörper in reinem Sand in Zukunft bestätigen, oder durch eine höhere Abbauaktivität kompensiert werden.

Die Exposition von Prüfkörpern in Kies führte nicht zu geringeren Abbauraten im Vergleich zur Exposition im Sand; vielmehr war die Abbauaktivität im Kies während der gesamten bisherigen Versuchsdauer höher. Ein positiver Effekt der geringen Wasserhaltekapazität von Kies bestätigte sich somit nicht. Die Einbettung von Prüfkörpern in Beton führte insbesondere bei Kiefer zu einer geringen Abbauaktivität. Der vergleichsweise stärkere Anstieg der Abbaubewertung im dritten Expositionsjahr lässt jedoch vermuten, dass dieser positive Effekt in den Folgejahren ausgeglichen oder sogar umgekehrt werden wird. Neben der langfristigen Neutralisation der zunächst stark alkalischen Bedingungen durch den Betonkontakt führte die Feuchteanreicherung im einbetonierten Teil der Prüfkörper zur Etablierung von für den pilzlichen Abbau günstigen Bedingungen. Ähnliche Effekte sind von schadhafte Beschichtungen bekannt: Wasser wird über Fehlstellen aufgenommen, während gleichzeitig die Wasserabgabe durch die Beschichtung behindert wird, und Feuchteanreicherungen die Folge sind (Rapp *et al.* 1998, Derbyshire und Carey 2001).

Die Ummantelung von Kiefernproben mit PE-Folie führte zu signifikant geringeren Abbaubewertungen im Vergleich zu allen übrigen Expositionsarten während der ersten zwei Jahre. Im dritten Expositionsjahr kam es aber zu dem vergleichsweise stärksten Holzabbau. Während der 3-Jahres-Auswertung wurde das Eindringen von Wasser durch die Folienschläuche in Verbindung mit einer Anreicherung von Feuchte in den Schläuchen beobachtet, weshalb ein weiterer Anstieg der Abbauraten zu erwarten ist. Gestützt wird diese Annahme durch Baecker (1993), der auch an Eukalyptuspfählen, die durch offen endende PE-Schläuche ummantelt waren, nur eine zeitlich begrenzte Schutzwirkung nachweisen konnte.

Moderfäule war der vorherrschende Fäuletyp bei beiden Holzarten und nahezu allen Bodensubstraten nach drei Jahren Exposition, gefolgt von Weißfäule (cf. Figure 7.7-4 und Figure 7.7-5). Braunfäule trat hingegen an keinem Prüfkörper auf. Über die dominierende Rolle von Moderfäule in verschiedenen Bodentypen berichteten auch Nilsson und Daniel (1990), Wakeling (1992) und Edlund (1998), wobei das Auftreten von Moderfäule unabhängig von der vorherrschenden Abbaugeschwindigkeit zu sehen ist. Unterschiede im Auftreten von Weißfäule bestanden sowohl zwischen den beiden Holzarten als auch zwischen den verschiedenen Bodensubstraten: Am häufigsten trat Weißfäule an Eichenproben im Testfeldboden mit Dünger auf (100%), gefolgt von Testfeldboden mit Sand (80%). Keine Weißfäule wurde hingegen an den einbetonierten Eichenproben gefunden. An den Kiefernprüfkörpern wurde signifikant weniger Weißfäule beobachtet als an Eiche.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen müssen nach einer bisherigen Expositionsdauer von drei Jahren zwar als vorläufig betrachtet werden, geben aber deutlich Aufschluss über die wichtige Rolle des Faktors Boden für die Dauerhaftigkeit und somit die Gebrauchsdauer von Holz im Erdkontakt. Auf die Notwendigkeit, verschiedene Standorte in Dauerhaftigkeitsuntersuchungen im Erdkontakt einzubeziehen, haben bereits andere Autoren hingewiesen (Johnson *et al.* 1987, Nilsson und Edlund 1995, Edlund *et al.* 2006, Wakeling 2006a). In dieser Untersuchung wurde deutlich, dass Unterschiede in der Abbaugeschwindigkeit und der Aktivität verschiedener Fäuletypen an ein und demselben Standort auftreten, hervorgerufen durch das vorliegende Bodensubstrat. So unterschied sich die Abbauaktivität zwischen den verschiedenen Substraten um bis zu Faktor 3,1 (Kiefer in Beton : Kiefer in Kompost).

Die Berücksichtigung des direkten Abbaufaktors "Bodensubstrat" für ein Gebrauchsdauer-Vorhersagemodell erscheint somit notwendig, nicht zuletzt weil sowohl Modifikationen des Holz-Boden-Kontaktes (z.B. Kiesgründungen) als auch Veränderungen des natürlich vorkommenden Mutterbodens (z.B. Düngung) gängige Praxis sind.

4.3.7 Art, Fäuletyp und Sukzessionsstadium

Die molekularbiologische Pilz-Identifizierung an Kiefernslint-Prüfkörpern aus Doppellagen-Testsets von verschiedenen Versuchsstandorten wurde durchgeführt, um mögliche Unterschiede in der Pilzflora zwischen verschiedenen Standorten sowie Zusammenhänge zwischen dem Auftreten bestimmter Arten und der Abbauentwicklung zu ermitteln (cf. Publikation VI, 7.6).

An den acht untersuchten Testsets wurden insgesamt 62 verschiedene Pilzarten nachgewiesen. 39 Arten wurden mehr als dreimal gefunden, wovon 30 Arten Ascomyceten und fünf Basidiomyceten waren; vier Pilze ließen sich nicht näher zuordnen (Tab. 13). Der am häufigsten gefundene Pilz war *Coniochaeta ligniaria* [(Grev.) Cooke], ein Moderfäulepilz (u.a. Bugos *et al.* 1988, López *et al.* 2004), der in 87 von 152 Proben (57%) auftrat. Darüber hinaus wurde Moderfäule sowohl durch die T-RFLP als auch durch die visuelle Inspektion der Prüfkörper (Tab. 14) als der dominierende Fäuletyp ermittelt, gefolgt von Weißfäule und Braunfäule, die an nur einem einzigen Prüfkörper auftrat. Ein weiterer häufig aufgetretener Pilz war *Exophiala spinifera* (Nilsen und Conant) McGinnis, der auch unter den Synonymen *Phialophora spinifera* und *Rhinocladiella spinifera* bekannt ist. *Exophiala spinifera* wird häufig mit Holzabbau in Verbindung gebracht. Insbesondere werden verschiedene *Phialophora*-Arten für Moderfäule verantwortlich gemacht (Käärik 1974, Daniel und Nilsson 1998).

Tab. 13. Pilze, die mindestens viermal durch T-RFLP und Sequenzierung identifiziert wurden, Anzahl ihres Auftretens (basierend auf ihrem Vorhandensein in den Holzproben, d.h. Oberflächen-Proben und/oder Bohrspäne-Proben) und Verteilung über die Test-Sets.

Pilz	Auf-treten	Feld-berg	Sankt Märgen	Hinter-zarten	Freiburg		Stuttgart		Ober-rottweil
					Sonne	Schatten	Sonne	Schatten	
Ascomyceten und Deuteromyceten									
<i>Coniochaeta ligniaria</i>	87	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Sordariomycetes</i> sp. 4	69	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Helotiales</i> sp. 3	59	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 14	53	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Exophiala spinifera</i>	49	x	x	x	x	x	x	x	x
Ascomycet 3	45	x	x	x	x	x	x	x	x
Ascomycet 4	38	x	x	x	x	x	x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 18	35	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Exophiala</i> sp. 2	28			x	x	x	x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 5	24	x	x	x	x	x	x	x	x
Ascomycet 2	21	x		x		x		x	
<i>Pezizomycotina</i> sp.19	21	x	x			x	x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 16	20	x	x	x		x	x		x
<i>Helotiales</i> sp. 1	19	x		x		x	x	x	x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 3	16	x	x	x	x	x	x		x
<i>Sordariomycetes</i> sp. 5	13	x				x		x	x
<i>Sordariomycetes</i> sp. 1	12	x					x	x	
<i>Pezizomycotina</i> sp. 8	12	x		x	x	x	x		x
<i>Herpotrichiellaceae</i> sp.	12				x				x
<i>Hymenoscyphus</i> sp. 2	12				x				
<i>Sordariomycetes</i> sp. 3	9	x	x		x		x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 12	9	x		x	x	x			
<i>Sordariomycetes</i> sp. 2	8	x		x	x				x
<i>Exophiala</i> sp. 1	8				x		x		
<i>Hymenoscyphus</i> sp. 1	8	x		x	x	x	x		
<i>Pezizomycotina</i> sp. 10	6				x		x		
<i>Pezizomycotina</i> sp. 17	5			x	x				x
<i>Epicoccum nigrum</i>	5	x	x	x					
<i>Pezizomycotina</i> sp. 4	4				x				x
<i>Cladosporium</i> sp	4	x		x	x	x			
Basidiomyceten									
Basidiomycet 2	20	x	x	x	x	x			x
<i>Sistotremastrum</i> sp.	20	x	x			x			x
<i>Rhodotorula lignophila</i>	18	x	x	x	x	x			
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	6	x	x	x	x	x			
Basidiomycet 1	4							x	
Nicht näher zugeordnet									
Unbekannter Pilz 10	35	x	x	x	x	x		x	x
Unbekannter Pilz 12	34		x	x	x		x	x	x
Unbekannter Pilz 14	24	x	x	x	x	x	x		x
Unbekannter Pilz 13	5	x			x				x

Tab. 14. Verteilung von Fäuletypen an Doppellagen-Prüfkörpern, basierend auf visueller Inspektion.

	Feld- berg	Sankt Märgen	Hinter- zarten	Freiburg		Stuttgart		Ober- rottweil	Σ
				Sonne	Schatten	Sonne	Schatten		
2003 (Oberflächen-Proben)									
Braunfäule	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Weißfäule	0	0	0	0	0	0	8	5	13
Moderfäule	1	2	4	6	5	2	4	5	29
2004 (Bohrspäne-Proben)									
Braunfäule	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Weißfäule	2	8	4	2	7	0	2	5	30
Moderfäule	6	6	9	10	1	5	3	5	45

Die Anzahl der durch Weißfäuleerreger abgebauten Prüfkörper stieg von 2003 auf 2004 im Vergleich zur Moderfäule stärker an. Weißfäule wurde in 2004 makroskopisch an allen Standorten nachgewiesen mit Ausnahme des Standorts Stuttgart Sonne. Dies wurde durch die T-RFLP bestätigt, da an diesem Standort keine Basidiomyceten identifiziert wurden. Braunfäule spielte in den gewählten Versuchsaufbauten insgesamt nur eine untergeordnete Rolle, da sie nur an einem Prüfkörper beobachtet wurde. So wurden durch die T-RFLP Braunfäuleerreger auch nur weniger als viermal gefunden: *Antrodia serialis* [(Fr.) Donk.] in Freiburg, *Gloeophyllum trabeum* [(Fr.) Murr.] auf dem Feldberg und *Oligoporus placenta* in Oberrottweil.

Während der Erstbesiedelung und der nachfolgenden Sukzession durch Pilze spielt die Holzfeuchte vermutlich eine große Rolle (Käärik 1974). Obwohl in der vorliegenden Untersuchung in den im Schatten exponierten Sets höhere Holzfeuchten vorlagen im Vergleich zu den frei exponierten Sets am selben Standort (Brischke und Rapp 2005a), wurde kein geringeres Auftreten von Moderfäule in den vermeintlich ungünstigeren, weil trockeneren Prüfkörpern nachgewiesen (Tab. 14). Es ist ein verbreiteter Irrglaube (Blanchette *et al.* 1990, Daniel und Nilsson 1998), dass Moderfäule nur in sehr feuchtem Holz auftritt. Diese Annahme wird auch durch diese Untersuchung widerlegt. Vielmehr sind Moderfäulepilze in der Lage, große Holzfeuchteschwankungen zu überstehen, und treten auch in Holz auf, das für lange Zeit trocken war und nur gelegentlich widerbefeuchtet wurde (Findlay 1966, Blanchette *et al.* 1990, Blanchette 2005, Schmidt 2006).

Moderfäulepilze gehören oft zu den ersten Besiedlern, aber auch zu den ersten Zerstörern des Holzes (Clubbe 1980, Eaton und Hale 1993). Clubbe (1980)

beobachtete, dass Moderfäulepilze sehr schnell sowohl von nicht-holzerstörenden Pilzen als auch von anderen holzerstörenden Pilzen auf Kiefernspiltholz verdrängt wurden. Andererseits treten Moderfäulepilze oft in ökologischen Nischen auf, in denen es weniger Konkurrenz durch Basidiomyceten gibt, und eine Verdrängung deshalb nicht unbedingt stattfinden muss (Daniel und Nilsson 1998). Weitere Ursachen für die Hemmung von holzerstörenden Pilzen, die prinzipiell für alle Fäuletypen gelten, sind in Kapitel 4.3.2, Tab. 10, aufgeführt. Es kann somit angenommen werden, dass Moderfäulepilze nur dann verdrängt werden, wenn die Bedingungen im und auf dem Substrat für holzerstörende Basidiomyceten ausreichend günstig sind. Der generelle Sukzessionsverlauf von Pilzen auf Holz lässt sich wie folgt in vier Stufen untergliedern (Käärik 1974, Levy 1982, Rayner und Boddy 1988, Dix und Webster 1995, Deacon 2006):

- Stufe 1) saprotrophische Pionierarten (primäre Schimmelpilze)
- Stufe 2) polymer-abbauende Arten (Moderfäulepilze)
- Stufe 3) sekundäre opportunistische Arten (Moderfäulepilze und sekundäre Schimmelpilze)
- Stufe 4) holzerstörende Basidiomyceten (Braun- und Weißfäulepilze)

Moderfäulepilze rufen im Vergleich zu Braun- und Weißfäulepilzen einen langsameren Abbau des Holzes hervor (Liese 1959, Käärik 1974, Schmidt 2006). In dieser Untersuchung lag die mittlere Abbaubewertung unter 2 (mittlerer Angriff). Nimmt man den oben beschriebenen Sukzessionsverlauf an und berücksichtigt weiterhin, dass sowohl die visuelle Inspektion als auch die T-RFLP-Technik Moderfäule als dominierenden Fäuletyp ergaben, entsprach das vorliegende Sukzessionsstadium der Stufe 2/beginnende Stufe 3. An einigen Standorten (Sankt Märgen, Freiburg Schatten) hatte sicherlich auch schon die letzte Stufe 4 eingesetzt, wie das verstärkte Auftreten von Weißfäule zeigte (Tab. 14).

Die Anzahl identifizierter Pilze unterschied sich signifikant zwischen den Standorten. Eine direkte Korrelation zwischen den klimatischen Charakteristika der Standorte (Niederschlagsmenge, Durchschnittstemperatur) ergab sich

hingegen nicht, so dass eine Kombination aus mehreren Faktoren die Artenvielfalt zu bestimmen scheint. Ferner erklären sich die Unterschiede in der Artenanzahl sowie der Abbauintensität zwischen den Standorten auch aus der offenbar unterschiedlich weit fortgeschrittenen Sukzession.

Der Berücksichtigung des direkten Abbaufaktors "auftretende Pilze und vorherrschender Fäuletyp" für ein Gebrauchsdauer-Vorhersagemodell steht somit folgendes entgegen:

- Bislang ließ sich kein direkter Zusammenhang zwischen dem Auftreten bestimmter Pilzarten und dem Beginn von Pilzbefall nachweisen (u.a. Carey 2002a, b).
- Die an einem Standort/ einem Bauteil auftretenden Arten ändern sich im Rahmen der Sukzession qualitativ und quantitativ mit der Zeit.
- Der Nachweis eines Zusammenhangs zwischen dem Auftreten bestimmter Pilze und den Klimabedingungen an einem Standort erscheint schwierig, da die Etablierung einer Art auf dem Substrat Holz vor allem von den mikroklimatischen und materialklimatischen Bedingungen abhängen dürfte.
- Die Konzentration von Pilzsporen in der Luft schwankt zwar sowohl saisonal als auch geographisch (Vasiliauskas *et al.* 2005, Green *et al.* 2006, Kasprzyk und Worek 2006), letztlich sind Pilzsporen aber als ubiquitär zu betrachten. Somit erscheint ein möglicher Einfluss des Auftretens bestimmter Arten auf einen Holzbefall gegenüber anderen Abbaufaktoren (z.B. Materialklima) gering.

Andere Verhältnisse ergeben sich für Holz im Erdkontakt, da dort ein direkter Kontakt zu einer bereits etablierten Pilzflora bestehen kann und Böden an verschiedenen Standorten von verschiedenen Fäuletypen dominiert werden (Edlund 1998, Wakeling 2006a, Augusta 2007).

4.4 Frühwarnsystem für Holzfeuchte-induzierte Befallsrisiken

Ziel dieses Untersuchungsteils war es, einerseits Unterschiede im Feuchteregime zwischen den verschiedenen Bauteilen der Essinger Brücke zu identifizieren und andererseits die Eignung einer kontinuierlichen Holzfeuchtemessung als Fäulnis-Frühwarnsystem zu untersuchen. Um eine

Installation der Messelektroden auch an einem Bauwerk im Gebrauch zu ermöglichen, wurden Messdübel anstelle von direkt in das Holz eingeleimten Elektroden verwendet.

Publikation III (7.3) enthält die Ergebnisse aus den ersten zwei Jahren der Holzfeuchteüberwachung an der Essinger Brücke. Die hieraus gewonnen Erkenntnisse decken sich weitgehend mit neuen Erkenntnissen nach nunmehr dreijähriger Untersuchungsdauer (Brischke und Rapp 2007) und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Auf der Wetterseite der Brücke wurden zu jedem Zeitpunkt höhere Holzfeuchten als auf der dem Wetter abgewandten Seite gemessen. In Abb. 23a ist dies für zwei Messstellen desselben Stiels gezeigt. Auf der Wetterseite stieg die Holzfeuchte im Winter auf bis zu 50% an, während die Holzfeuchte auf der Nicht-Wetterseite 30% nicht überschritt.
- Die Holzfeuchte im Bereich der unteren Nagelplatten war in den untersuchten Stielen signifikant höher als direkt oberhalb der Nagelplatten (Abb. 23b). Das in diesen Bereichen stark erhöhte Befallsrisiko wird durch starken Braunfäulebefall bestätigt, der an acht verschiedenen Stielen ausschließlich im Bereich der unteren Nagelplatten detektiert wurde.
- Das Risiko einer Feuchteanreicherung war im Bereich der oberen Nagelplatten deutlich geringer als im Bereich der unteren Nagelplatten (Abb. 23c). Dennoch war die Holzfeuchte im Bereich einiger oberer Nagelplatten auf der Wetterseite ähnlich hoch wie im Bereich der unteren Platten, aber niemals höher.
- Die Holzfeuchte in von Fäulnis (hier: Braunfäule) betroffenen Bereichen war stark erhöht. Da die Fäulnis nur im Bereich von Nagelplatten auftrat, kam es auch nicht zu einer Wiederaustrocknung des Holzes (Abb. 23d).
- Die an den Zugbändern angebrachten Sperrholzabdeckungen erwiesen sich als effektive Schutzmaßnahme; die Holzfeuchte in den Zugbändern überschritt die kritische Holzfeuchte von 25% zu keinem Zeitpunkt (Abb. 23e).

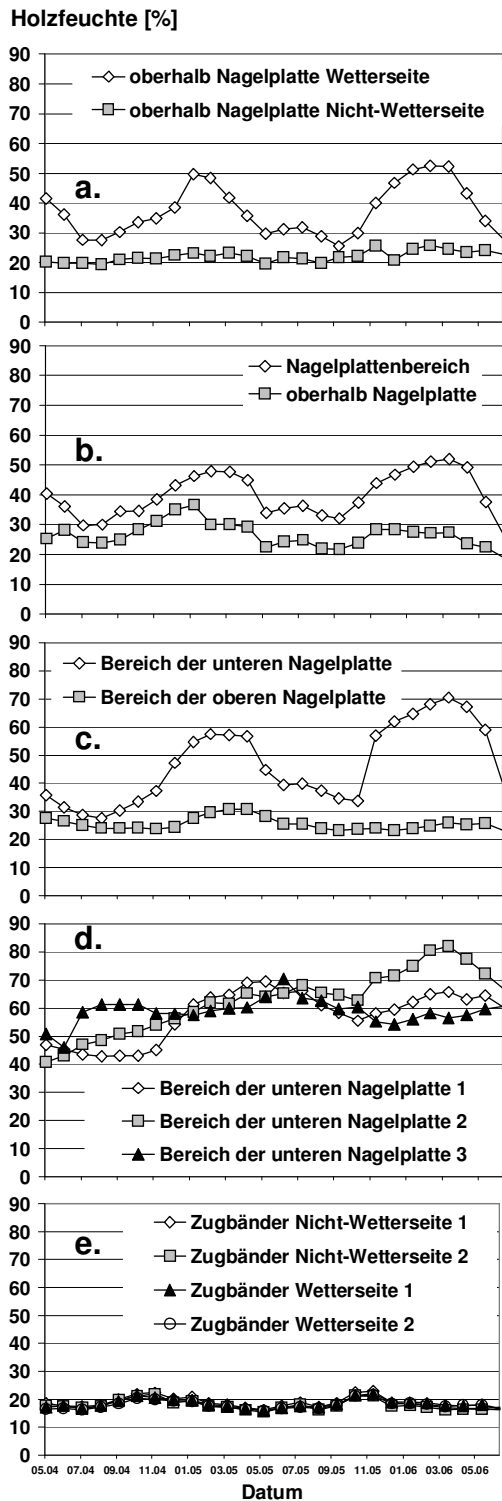


Abb. 23. Beispiele für Verläufe der mittleren monatlichen Holzfeuchten ausgewählter Bauteile der Essinger Brücke im Vergleich. (a) Stiele auf der Wetter- und der Nicht-Wetterseite, oberhalb von Nagelplatten, (b) Stiel im Bereich von Nagelplatten und oberhalb der Nagelplatten, (c) Stiel im Bereich der unteren und der oberen Nagelplatten, (d) drei Stiele im Nagelplattenbereich mit bereits etablierter Braunfäule, (e) vier Messstellen in den durch Sperrholz-bleidungen geschützten Zugbändern auf der Wetter- und der Nicht-Wetterseite.

Das angewandte Messsystem, insbesondere in Kombination mit den Schutzmittel-behandelten Messdübeln, erwies sich als geeignetes Instrument für eine langfristige Holzfeuchtemessung und -überwachung. Unterschiedlich starke Gefährdungen in Form eines holzfeuchteinduzierten Befalls ließen sich

ermitteln und quantifizieren, z.B. zwischen Wetter- und Nicht-Wetterseite der Brücke.

Die Holzfeuchte-Langzeitmessung scheint prinzipiell als Frühwarnsystem für das Auftreten Feuchte-induzierter Befallsrisiken geeignet, wie die Messungen an den Zugbändern gezeigt haben. Hier konnte die Wirksamkeit der konstruktiven Schutzmaßnahmen während des gesamten Untersuchungszeitraumes nachgewiesen werden. Die Messungen im unteren Bereich der Stützpfiler zeigten hingegen über Monate eine insgesamt zu hohe Feuchtebelastung mit Holzfeuchten oberhalb 30%, so dass das Erkennen neu auftretender Feuchtenester kaum möglich war. Die Überwachung eines Gesamtbauwerkes durch automatisierte Holzfeuchtemessungen erscheint als sinnvolle Maßnahme, um sowohl das Maß des konstruktiven Holzschutzes als auch das aktuelle Gefährdungspotential eines Bauwerks zu bestimmen. Hierzu sollten die kritischen Punkte/Bauteile aus statischer wie auch aus holzschutztechnischer Sicht mit Messfühlern ausgestattet werden. In Verbindung mit Alarmmeldern würden sich Leckagen oder auf andere Weise verursachte Feuchteanreicherungen aufdecken lassen, bevor es zu einem Schaden durch Pilzbefall kommt.

Einige Bau-Richtlinien sehen bereits den Verzicht chemischer Schutzmaßnahmen an tragenden Bauteilen im Innenbereich vor, sofern sichergestellt ist, dass ein möglicher Schaden durch holzzerstörende Insekten zu einem sehr frühen Zeitpunkt bemerkbar wird (z.B. die sogenannte Gefährdungsklasse 0, DIN 68800-3, 1990). Überträgt man diese Idee auf Holzfeuchte-induzierte Befallsrisiken durch Pilze, ließe sich ein Langzeit-Holzfeuchtemesssystem für die Früherkennung einsetzen und einen Beitrag zur Verringerung von Bioziden in Gebäuden leisten.

4.5 Zusammenhang zwischen Gebrauchsdauervorhersage und Performance-basierter Klassifizierung von Holzprodukten

4.5.1 Rahmenbedingungen

Der im Kapitel 2.3 gegebene Überblick über bisherige Versuche, zu einer wissenschaftlich verlässlichen Gebrauchsdauervorhersage zu kommen, sowie die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen

Untersuchungen haben gezeigt, dass zum heutigen Zeitpunkt zwar vielversprechende Ansätze vorliegen, ein allumfassendes Modell aber noch nicht verfügbar ist. Im Folgenden soll deshalb anhand eines Fahrplans (engl.: Roadmap) aufgezeigt werden, wie eine Klassifizierung der Performance von Holzprodukten mit bereits jetzt vorhandenen Methoden möglich wäre. Wie für eine Roadmap üblich, ist nicht jeder einzelne Schritt festgelegt, sondern Spielraum für Diskussionen vorhanden.

Start- und Zielpunkt einer Roadmap zur Spezifizierung von Holzprodukten lassen sich wie folgt definieren: Der Startpunkt sind sicherlich die Forderungen, die sowohl vom Verbraucher als auch von der CPD (1988) an die Spezifizierung gestellt werden (*cf.* Kapitel 2.1). Das Ziel des Weges ist ein funktionierendes und innerhalb der Europäischen Union einheitliches Spezifizierungssystem selbst. Wie die vorangegangenen Ausführungen gezeigt haben, lässt sich dieses Ziel nur über eine irgendwie geartete Vorhersage der Performance von Holzprodukten erreichen (Abb. 24). Im Folgenden werden die verschiedenen Zwischenstationen auf der Roadmap in einzelnen Kapiteln beschrieben und diskutiert.

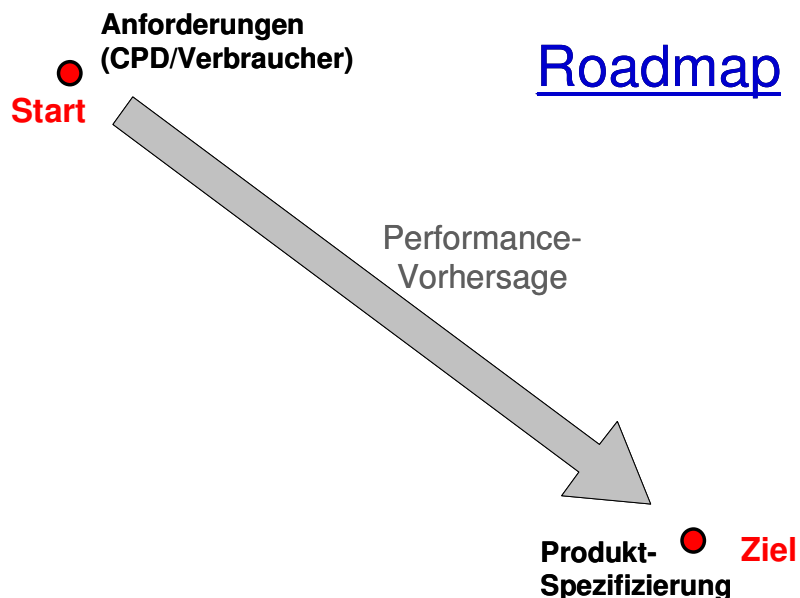


Abb. 24. Start- und Zielpunkt einer Roadmap für die Spezifizierung von Holzprodukten.

4.5.2 Festlegung der notwendigen Anzahl von Referenz-Gebrauchsdauern

Die Performance eines Holzproduktes vorherzusagen, bedeutet prinzipiell nichts anderes, als seine Gebrauchsdauer vorherzusagen. Die Gebrauchsdauer eines Produkts endet, sobald die Performance-Anforderungen unterschritten werden, unabhängig von der Art der Anforderungen (funktional, statisch oder ästhetisch). Deshalb lässt sich Performance-Vorhersage gleichsetzen mit Gebrauchsdauervorhersage und die Prinzipien für eine Gebrauchsdauer-Planung der ISO-Norm 15686 sind anzuwenden. In Anlehnung an ISO 15686-1 (2000) lässt sich die zu erwartende Gebrauchsdauer (ESL) aus einer Referenz-Gebrauchsdauer (RSL) und verschiedenen Einflussfaktoren (modifying factors) ermitteln (*cf.* Gleichung 1), wobei die Einflussfaktoren alle Bedingungen einschließen, die von definierten Referenzbedingungen abweichen. Die in ISO 15686-1 (2000) genannten Faktoren wurden bereits in Kapitel 2.3.3 (Tab. 2) beschrieben.

Aus den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung ergibt sich, dass der zu erwartende statistische Gesamtfehler mit zunehmender Anzahl unbekannter Variablen größer wird. Es wird somit offensichtlich, dass die Berücksichtigung nur einer einzigen RSL mit dann notwendigen vielen Variablen eine hohe Fehlergefahr birgt, insbesondere weil viele der Einflussfaktoren bislang nur unzureichend untersucht sind. Um die Beeinflussung durch die verschiedenen Einflussfaktoren trotzdem berücksichtigen zu können, müssen verschiedene RSLs ermittelt werden. Die notwendige Zahl an RSLs richtet sich dabei nach der Zahl verschiedener Expositionsbedingungen, die für den Einsatz von Holz in Frage kommen. Es liegt auf der Hand, dass Holz unter verschiedenen Expositionsbedingungen unterschiedlich lange Gebrauchsdauern aufweist, z.B. aus demselben Material hergestellte Zaunpfähle im Erdkontakt und Balken innerhalb einer überdachten Konstruktion. Vielfach ist die jeweilige Exposition dabei auch einer bestimmten Produktgruppe zuzuweisen. Tab. 4 zeigt, wie Produkte, Expositionsbedingungen und die zu erwartende Performance zueinander im Verhältnis stehen.

Tab. 15. Verschiedene Expositionskategorien mit zugehörigen Gebrauchsklassen in Anlehnung an EN 335-1 (2006), Produktgruppen und eventuell geeignete Prüfmethode.

ID	Entspricht GK	Expositionskategorie	Produkt-Gruppe	Prüfmethode	
A	1	innen	Dachbalken, Sparren	?	→ RSL
B	2	ohne Erdkontakt abgedeckt	Außenwände, Schwellen	?	→ RSL
C	3.1	ohne Erdkontakt abgedeckt	Fenster	L-joint EN 330	→ RSL
D	3.2 a	ohne Erdkontakt leichte Beanspruchung	Fassaden, Zaunlatten	?	→ RSL
E	3.2 b	ohne Erdkontakt starke Beanspruchung	Decks, Beläge	Double layer/ Multiple layer?	→ RSL
F	4	Erdkontakt	Masten, Pfähle, Bahnschwellen	EN 252	→ RSL
G	5	Meerwasserkontakt	Schiffe, Anleger	EN 275	→ RSL
H		Gefährdung durch Termiten	-	?	→ RSL

Eine einfache Gleichsetzung von Exposition und Produkt ist aber nicht in jedem Fall möglich, wie z.B. bei Fenstern, die gewöhnlich beschichtet sind, und wie eine Fassade exponiert werden. Dennoch ist eine völlig andere Performance der beiden Produkte Fenster und Fassade zu erwarten. In diesem Fall ist eine Unterscheidung zwischen beschichteten und unbeschichteten Produkten innerhalb derselben Exposition "außerhalb des Erdkontakts" notwendig. Ein weiteres Beispiel für die Notwendigkeit einer differenzierteren Klassifizierung von Produkt- und Expositionskategorien ist die Gefährdung durch Termiten. Die regional auftretende Gefährdung durch Termiten ist nicht auf einzelne Produktgruppen beschränkt, sondern betrifft nahezu alle Holzprodukte und erfordert deshalb eine eigene Kategorie (in EN 335-1, 2006, werden die Gebrauchsklassen 1-4 durch den Zusatz T bei möglichem Auftreten von Termiten gekennzeichnet).

Einige Expositionskategorien in Tab. 15 sind identisch mit den in EN 335-1 (2006) aufgeführten Gebrauchsklassen und ließen sich aus der Norm übernehmen. Die Gebrauchsklasseneinteilung nach EN 335 wird aber auch nach der Verabschiedung einer Neufassung im Jahr 2006 national und

international kontrovers diskutiert. Insbesondere die Gebrauchsklasse 3 schien für eine ausreichend genaue Spezifizierung von Holzprodukten zu weit gefasst zu sein und bedurfte einer weiteren Unterteilung. In Tab. 15 wird hingegen zunächst zwischen beschichteten und unbeschichteten Produkten differenziert und erst in einem weiteren Schritt zwischen einer leichten und einer starken Beanspruchung für unbeschichtete Produkte unterschieden. Der Bedarf für weitere Unterscheidungen steht zur Diskussion.

Die für eine ausreichend präzise Performance-Klassifizierung notwendige Anzahl von zu ermittelnden Referenzgebrauchsdauern ergibt sich somit aus der Anzahl von Expositionskategorien, über die idealerweise europaweit eine Einigung zu erzielen ist. Hierbei sollte der Grundsatz gelten, nur so viele Kategorien wie nötig und so wenige wie möglich zu unterscheiden. Die erste Zwischenstation der Roadmap ist somit die Festlegung von "notwendigen Expositionskategorien" (Abb. 25).

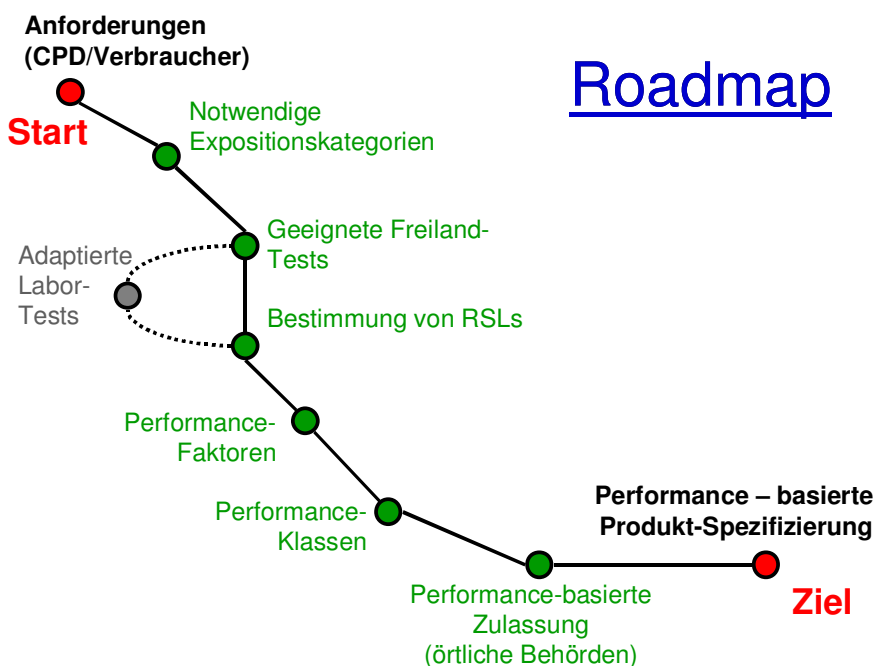


Abb. 25. Roadmap für die Spezifizierung von Holzprodukten.

4.5.3 Bestimmung von Referenz-Gebrauchsdauern in Freilandprüfungen

Nachdem eine Einigung auf eine bestimmte Zahl verschiedener Expositionskategorien erfolgt ist, lassen sich im nächsten Schritt für jede Kategorie RSLs bestimmen. Hierzu ist es notwendig, geeignete Prüfmethode zu finden, die die verschiedenen Expositionen repräsentieren. In Tab. 15 finden sich einige Beispiele für Freiland-Prüfungen, die hilfreich für die Bestimmung von RSLs in den jeweiligen Expositionskategorien sein könnten: Eingrabeversuche nach EN 252 (1990) für den Erdkontakt oder L-Joint-Tests nach EN 330 (1993) für beschichtete Fensterteile sind fest etablierte Prüfmethode, mit denen bereits umfangreiche Erfahrungen in Europa gemacht wurden.

Für andere Expositionskategorien fehlen hingegen geeignete Prüfmethode und die Anpassung bereits bestehender Methoden oder die Entwicklung neuer Methoden stellen den nächsten Schritt auf der Roadmap dar ("Geeignete Freiland-Tests", Abb. 25).

4.5.4 Bestimmung von Referenz-Gebrauchsdauern in adaptierten Laborprüfungen

Geeignete Prüfmethode zur Ermittlung von RSLs müssen nicht notwendigerweise Freiland-Prüfungen sein. Insbesondere die Holzindustrie, aber auch wissenschaftliche Einrichtungen und Materialprüfanstalten, haben ein großes Interesse an schnelleren Kurzzeit-Methoden, nicht zuletzt um eine zügige Zulassung von Produkten für bestimmte Anwendungen zu erreichen (McNamara 1994, Van Acker *et al.* 2003, Saunders und Powell 2006). Dennoch sollten in erster Linie Methoden, die so realitätsnah wie möglich sind, für die Bestimmung von RSLs herangezogen werden. Abgesehen vom tatsächlichen Gebrauch (in-service performance) sind dies in der Regel Freiland-Prüfmethode (u.a. Hedley 1993, Nilsson und Edlund 1995, Augusta 2007).

Eine Anleitung, wie sich auch Kurzzeit-Prüfungen für Gebrauchsdauervorhersagen und somit für die Klassifizierung von Holzprodukten nutzen lassen, gibt ISO 15686-2 (2001). In Abb. 26 ist schematisch ein Auszug der systematischen Methodik zur Gebrauchsdauervorhersage von Bauteilen dargestellt.

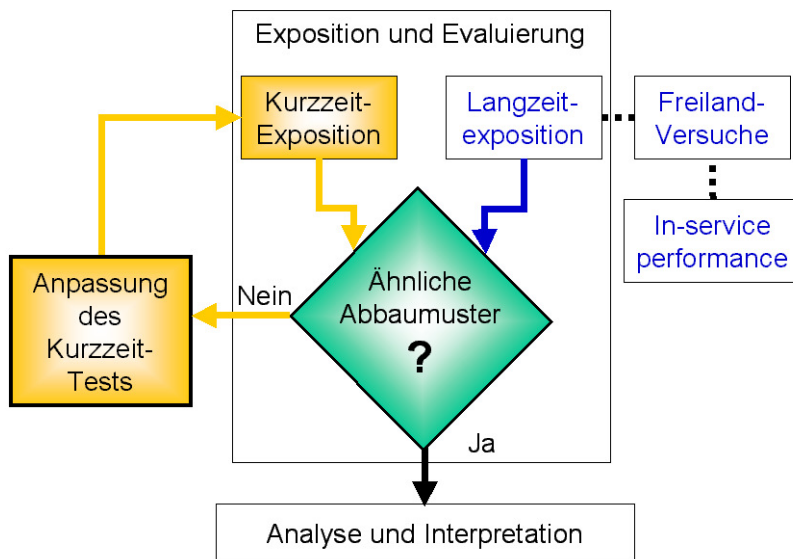


Abb. 26. Systematische Methodik für die Gebrauchsdauervorhersage von Bauteilen (modifiziert nach ISO 15686-2 (2001)).

Sollen Kurzzeit-Prüfmethoden angewandt werden, ist es unerlässlich, die von in Kurzzeit- und Langzeit-Methoden auftretenden Abbaumuster zu vergleichen. Solange nicht wenigstens ähnliche Abbaumuster vorliegen, ist es notwendig, die Kurzzeit-Methode zu verändern und der Langzeit-Methode anzupassen. Sind ähnliche Abbaumuster vorhanden, spricht nichts gegen die Einbeziehung von Kurzzeit-Methoden bzw. von Laborprüfungen. Im Gegenteil, für einige Expositionskategorien scheinen Kurzzeit-Tests die einzige Möglichkeit zur Einschätzung des Gefährdungspotentials zu sein: Für Holz, das abgedeckt und außerhalb des Erdkontaktes eingesetzt wird, z.B. als Außenwand, wären unter Umständen Versuchsdauern unter realistischen Bedingungen von mehreren Jahrzehnten notwendig, bis ein erster Befall durch holzerstörende Organismen eintritt. In diesem Fall, würden beispielsweise Holzfeuchtemessungen über eine begrenzte Zeitdauer eine Alternative zu langjährigen Freilandversuchen bieten. Wie auch immer die einzelnen Prüfmethode im Detail aussehen mögen, ist für die Roadmap zunächst nur entscheidend, dass für jede Expositionskategorie eine Prüfmethode gefunden wird, um die entsprechenden RSLs ermitteln zu können. Der nächste Zwischenhalt auf der Roadmap ist somit die "Bestimmung von RSLs" (Abb. 25); die Anpassung von Labormethoden erscheint dabei als Seitenstraße auf der Roadmap.

4.5.5 Performance-Faktoren

Die mit Hilfe der verschiedenen Prüfmethode n ermittelten Ergebnisse lassen sich nun direkt für die Vorhersage und Klassifizierung von Holzprodukten nutzen. Das Ergebnis jeder Freilanduntersuchung ist die Gebrauchsdauer eines Prüfkörpers in Jahren, einerseits die Gebrauchsdauer des zu prüfenden Materials X und andererseits die Gebrauchsdauer eines Referenzmaterials. Als Referenzmaterial kommt beispielsweise Kiefern splint (*Pinus sylvestris*), wie in diversen europäischen Standards vorgesehen, theoretisch aber auch jedes andere Material in Frage.

Somit ergeben sich aus jedem Freilandversuch zwei wesentliche Ergebnisse:

$SL_{\text{Material X}}$ = Gebrauchsdauer eines zu untersuchenden Materials X

SL_{Referenz} = Gebrauchsdauer der Referenz

Um die Performance des Materials X unabhängig von standortbedingten Einflüssen zu charakterisieren, erscheint es sinnvoll, das Prüfergebnis als Faktor anzugeben:

Gleichung 8. Berechnung eines Performance-Faktors PF

$$PF = SL_{\text{Material X}} / SL_{\text{Referenz}} \text{ [a/a]}$$

In Übereinstimmung mit der in Tab. 15 vorgenommenen Unterteilung müssen nun auch die Performance-Faktoren auf die verschiedenen Expositionskategorien bezogen werden und es muss für jede einzelne Kategorie ein Faktor wie folgt ermittelt werden:

Beispiel zur Bildung eines Performance-Faktors:

Expositionskategorie F: Erdkontakt

Prüfmethode: EN 252 (1990)

$SL_{\text{Material X}}$ = 6,9 Jahre

SL_{Referenz} = 3,0 Jahre

Gleichung 9. Beispiel für die Berechnung eines Performance-Faktors PF_F

$$PF_F = SL_{\text{Material X}} / SL_{\text{Referenz}} = 6,9/3,0 = 2,3 \text{ [a/a]}$$

$PF_F = 2,3$ bedeutet eine 2,3mal längere Gebrauchsdauer als die Referenz im Erdkontakt (Expositionskategorie F). Mit Hilfe von Performance-Faktoren lässt sich nun das zu prüfende Material für jede Expositionskategorie detailliert und präzise charakterisieren. Prinzipiell wäre bereits an dieser Stelle jedes Material durch eine Reihe von Performance-Faktoren spezifizierbar.

4.5.6 Performance-Klassen

Die Verwendung einer Vielzahl von Performance-Faktoren zur Charakterisierung von Produkten ist voraussichtlich für die Praxis zu unübersichtlich. Die Bildung von Performance-Klassen, ähnlich der Dauerhaftigkeitsklassifizierung nach EN 350-1 (1994), wäre deshalb eine Möglichkeit, die Spezifizierung von Holzprodukten übersichtlicher zu gestalten (Abb. 27). Unerlässlich bleibt jedoch die Trennung der Performance-Klassen nach Expositionskategorien.

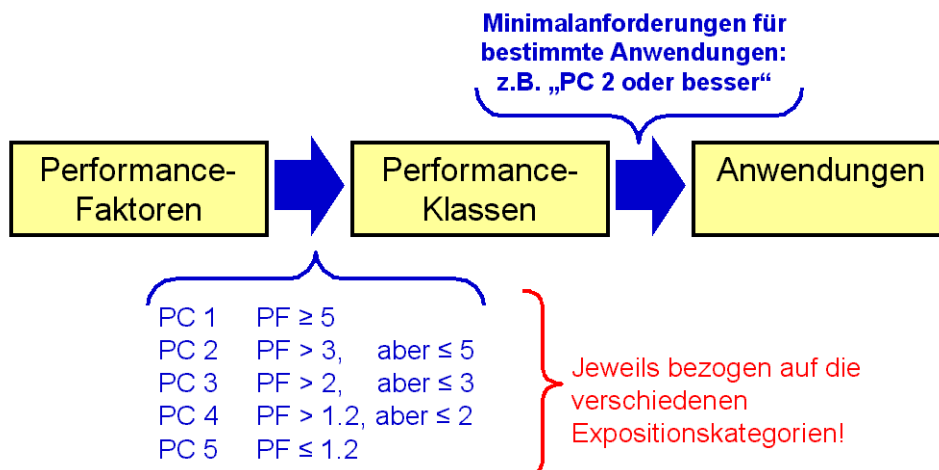


Abb. 27. Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Performance-Faktoren, Performance-Klassen und Performance-basierter Zulassung.

Im Rahmen der Spezifizierung bleibt es letztlich Aufgabe der lokalen Behörden, festzulegen, welche Mindestanforderungen für welche Anwendung gelten sollen (Beispiel in Abb. 27). Dies ist der letzte Zwischenhalt auf der Roadmap.

4.5.7 Standortbeziehungen

Im Kapitel 4.5.5 wurde der Einfluss des Standorts auf das Prüfergebnis bewusst nicht berücksichtigt. Im Gegenteil, die Bildung von Faktoren diene vielmehr der Unterdrückung des Standorteinflusses. Dennoch hat der Standort einen z.T.

starken Einfluss auf die Prüfergebnisse (u.a. Edlund 1998, Francis und Norton 2006, Wakeling 2006a). Die Freilandprüfung desselben Materials an verschiedenen Standorten führt unweigerlich zu unterschiedlichen Gebrauchsdauern. Tab. 16 gibt ein fiktives Beispiel für Prüfergebnisse aus L-Joint-Tests (EN 330, 1993), die an den drei Standorten London, Hamburg und Bordeaux ermittelt worden seien.

Tab. 16. Fiktives Beispiel für die Berechnung von Performance-Faktoren an verschiedenen Standorten.

Standort	SL _{Material X}	SL _{Referenz}	PF _{3.2.a} (L-Joint)
London	18 Jahre	9 Jahre	2,0
Hamburg	24 Jahre	12 Jahre	2,0
Bordeaux	30 Jahre	15 Jahre	2,0

Sowohl das zu untersuchende Material X als auch das Referenzmaterial weisen drei unterschiedliche Gebrauchsdauern an den drei Standorten auf. Idealerweise führt nun aber die Berechnung der Performance-Faktoren an allen Standorten zu dem gleichen Ergebnis (hier: $PF_{3.2.a} = 2,0$). Eine gewisse Variation der Performance-Faktoren zwischen verschiedenen Standorten muss sicherlich erwartet werden, sollte sich aber in einer akzeptablen Größenordnung bewegen. Die Beziehung zwischen zwei Standorten lässt sich über die Gebrauchsdauer des Referenzmaterials in Form von Faktoren (Inter-site factor ISF) berechnen, z.B. zwischen London und Bordeaux:

Gleichung 10. Beispiel für die Berechnung eines Inter-site factors (ISF)

$$ISF_{BDX/LON} = SL_{Referenz / BDX} / SL_{Referenz / LON} = 15 \text{ Jahre} / 9 \text{ Jahre} = 1,67$$

Ein weiteres Beispiel zeigt die praktische Bedeutung des Wissens um die zwischen-standörtlichen Beziehungen:

Annahmen:

1. Material X soll in Bordeaux verwendet werden.
2. Material X wurde bislang nur in London geprüft.

Fragestellung: Wie hoch ist die geschätzte Gebrauchsdauer (ESL) von Material X in Bordeaux?

Mit Hilfe des $ISF_{BDX/LON}$ lässt sich die zu erwartende Gebrauchsdauer wie folgt berechnen:

Gleichung 11. Beispiel für die Berechnung einer zu erwartenden Gebrauchsdauer mittels eines Inter-site factors

$$ESL_{\text{Material X / BDX}} = SL_{\text{Material X / LON}} \bullet ISF_{BDX/LON} = 18 \text{ Jahre} \bullet 1,67 = 30 \text{ Jahre}$$

Zusammenfassend lassen sich somit zwei wesentliche Ergebnisse aus den verschiedenen Freilandprüfungen erzielen:

- 1) Performance-Faktoren, die die relative Gebrauchsdauer eines Materials X zur Gebrauchsdauer eines Referenzmaterials darstellen und sich zur Spezifizierung von Holzprodukten eignen.
- 2) Inter-site factors, die quasi als Nebenprodukt von Freilandversuchen anfallen, das Verhältnis zwischen zwei Versuchsstandorten in Form des vorliegenden Gefährdungspotentials beschreiben und für Gebrauchsdauer-Vorhersagemodelle und die Kartierung von Gefährdungspotentialen verwendbar sind.

5 FOLGERUNGEN UND AUSBLICK

5.1 Zusammenspiel von Gebrauchsdauervorhersage und Performance-basierter Klassifizierung

Die dringende Notwendigkeit, ein System zur Vorhersage der Gebrauchsdauer und zur Klassifizierung der Performance von Holzbauteilen zu entwickeln und europaweit zu etablieren, ergibt sich aus der weltweit zunehmenden Implementierung von Performance-basierten Spezifikationen, den Anforderungen der CPD (1988) und nicht zuletzt aus den Wünschen von potentiellen Kunden und Anwendern des Werkstoffs Holz.

Es zeigt sich, dass weder die Holzwissenschaft noch die europäische Normung zum derzeitigen Stand über Mittel und Lösungen verfügen, die Gebrauchsdauer oder Performance von Holzprodukten präzise vorherzusagen. Es erscheint somit notwendig, die Herausforderungen zweigleisig anzugehen:

- 1) Zur Schaffung eines europaweit einheitlichen Klassifizierungssystems sollten die bestehenden Prüfmethoden (nach ggf. notwendiger Adaption) eingesetzt werden. Hierzu ist eine Einigung auf eine bestimmte Anzahl von Expositionskategorien notwendig, um das mangelnde Wissen über den Einfluss der verschiedenen Abbaufaktoren auszugleichen und somit eine ausreichend präzise Einschätzung der zu erwartenden Performance zu gewährleisten.
- 2) Zugleich sollten experimentelle Arbeiten, die zur Schaffung einer breiten und verlässlichen Datenbasis für Gebrauchsdauervorhersage-Modelle beitragen, weitergeführt und intensiviert werden. Hierzu gehören die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Funktionen sowie Untersuchungen zum Einfluss der verschiedenen Abbaufaktoren.

Idealerweise lassen sich beide "Gleise" zu einem späteren Zeitpunkt wieder zusammenführen, sodass ein bereits existierendes Klassifizierungssystem schrittweise durch zusätzliche Informationen auf eine breitere Datenbasis gestellt und somit validiert wird.

5.2 Ableitung grundlegender Annahmen zur Erstellung eines Vorhersagemodells

Sowohl die Auswertung der einschlägigen Literatur als auch die eigenen experimentellen Arbeiten haben gezeigt, dass vielfältige Einflussfaktoren für die Vorhersage der Gebrauchsdauer von Holz zu berücksichtigen sind, sich der Einfluss der zahlreichen indirekten Faktoren aber auf wenige direkte Faktoren reduzieren lässt. Es empfiehlt sich somit, für die Gebrauchsdauervorhersage einen offenen mehrstufigen Modellansatz zu wählen, der in erster Instanz die wichtigsten direkten Faktoren, insbesondere die Schlüsselfaktoren Holzfeuchte und Holztemperatur, erfasst, in weiteren Stufen aber erweiterbar ist um den Einfluss indirekter Abbaufaktoren. Die verschiedenen holzerstörenden Organismen lassen sich aufgrund unterschiedlicher Lebensweisen, Umgebungsansprüche, Verbreitungen und Abbaumechanismen grob in fünf Gruppen unterteilen: Termiten, Käfer, Pilze, Bakterien und marine Holzzerstörer. Hierbei schließen bestimmte Anforderungen der einen Gruppe eine Gefährdung durch eine andere Gruppe teilweise aus. Ein Vorhersagemodell sollte deshalb zunächst nur eine Gruppe von Holzzerstörern berücksichtigen. Erst in einem späteren Schritt lassen sich dann Teilmodelle für die verschiedenen Gruppen zusammenführen.

Um eine ausreichende Datenbasis für ein Vorhersagemodell zu schaffen, erscheint es unumgänglich, alle verfügbaren Datenquellen zu nutzen, die aus wissenschaftlicher Sicht vertretbar sind. Darüber hinaus besteht Bedarf für weitere Forschungsarbeiten, um die noch bestehenden Lücken zu schließen. Der Fokus zukünftiger Arbeiten sollte stärker als bisher auf der Entwicklung und Anwendung realitätsnaher Prüfmethode, auf vergleichenden Untersuchungen zwischen der Performance unter Labor-, Freiland- und Gebrauchsbedingungen sowie auf den Wechselwirkungen zwischen direkten Abbaufaktoren und den abbauenden Organismen liegen.

Der Einfluss indirekter Faktoren auf die direkten Abbaufaktoren (z.B. Einfluss des Klimas auf die Holzfeuchte) sollte zwar erst in einer zweiten Stufe des Modells berücksichtigt werden, die Notwendigkeit für die Untersuchung solcher Wechselwirkungen ist aber bereits jetzt offensichtlich. Somit ist die Entwicklung

von Klima-Indizes nach wie vor wünschenswert, sollte aber um den Einfluss direkter Abbaufaktoren erweitert werden.

Da eine gesicherte Datenbasis die Voraussetzung für eine verlässliche Gebrauchsdauervorhersage ist, wäre das Einsetzen eines unabhängigen Kontrollgremiums hilfreich. Zur Sicherung der Validität eines Modells sollten Daten hinsichtlich wissenschaftlicher Korrektheit auf Verlässlichkeit, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit überprüft werden, bevor sie in ein Modell eingefügt werden.

5.3 Langzeit-Messung der Holzfeuchte (Monitoring)

Das für die Langzeit-Messung im Freiland und an Bauwerken im Gebrauch entwickelte System erwies sich als verlässlich und hilfreich für die Quantifizierung des direkten Abbaufaktors Holzfeuchte. Die Installation der Elektroden mit graphithaltigem Epoxidklebstoff führte zu einer langfristig dauerhaften Verbindung mit dem Holz, die selbst bei einsetzender Fäule im Holz fortbestand. Am Beispiel der Fußgängerbrücke in Essing ließ sich die große Bedeutung der Holzfeuchte für die sich in einer bestimmten Einbausituation einstellende Gefährdung durch Pilzbefall nachweisen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung belegten weiterhin die Eignung des Messsystems als Fäulnisfrühwarnsystem. Unter der Maßgabe, dass sich die Sollfeuchten in einem Holzbauwerk unterhalb Fasersättigung befinden, lässt sich ein Feuchte-induziertes Befallsrisiko frühzeitig erkennen und es lassen sich geeignete Maßnahmen zur Abwendung treffen.

5.4 Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen

Die Ermittlung und Quantifizierung der direkten Abbaufaktoren Holzfeuchte und Holztemperatur in Untersuchungen im Freiland und an Bauwerken im Gebrauch erwies sich als geeignetes Mittel zur Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen, wobei die Berechnung der Dosis aus kombinierten Tageswerten der Holzfeuchte und Holztemperatur die beste Korrelation mit den zugehörigen Abbauwerten erbrachte. Zusammenhänge zwischen dem Abbaufortschritt und den indirekten Einflussfaktoren Makroklima und Mikroklima erwiesen sich als sehr gering korreliert.

Weitere Verbesserungen der erhaltenen Dosis-Wirkungs-Funktionen sind vorstellbar und sollten in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden:

- Möglicherweise existiert eine Zeitabhängigkeit der Dosis-Wirkungs-Beziehung, die durch unterschiedliche Kardinalpunkte der Temperatur und der Feuchte in verschiedenen Stadien des Befalls (z.B. Sporenkeimung, Mycelwachstum) verursacht ist.
- Verschiedene Störgrößen, z.B. längere Frost- oder Trockenperioden, haben vermutlich Einfluss auf den Abbaufortschritt und ließen sich durch Gewichtung von Zeitintervallen mit besonders hohem oder niedrigem Abbaupotential berücksichtigen.
- Durch Ausbringung von Prüfkörpern in den Tropen und Subtropen ließe sich das Expositionsspektrum erweitern, da diese Klimate bisher nur durch die Exposition in einem tropischen Gewächshaus berücksichtigt wurden.
- Unterschiede im Abbaufortschritt werden vermutlich durch den vorherrschenden Fäuletyp hervorgerufen. Die bisherige Datenbasis sollte deshalb durch Ergebnisse von Braunfäule dominierten Standorten und von weiteren Holzarten erweitert werden.

Ausgehend von der praktischen Anwendbarkeit eines Vorhersagemodells, besteht sicherlich Bedarf für leichter generierbare Daten, da es für den Anwender nahezu unmöglich ist, Holzfeuchte- und Holztemperaturdaten für einen bestimmten Standort oder eine bestimmte Exposition zu erhalten. Somit wäre der nächste Schritt, die Verwendbarkeit von leicht zugänglichen Wetterdaten zu ermöglichen. Hierzu sind Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen der Holzfeuchte, der Niederschlagsmenge und der Niederschlagsdauer für verschiedene Expositionsbedingungen notwendig.

Die Untersuchung weiterer ausgewählter Einflussfaktoren ergab u.a., dass sich bei im Erdkontakt exponiertem Holz neben dem Einfluss des Standorts auch das vorliegende Bodensubstrat wesentlich auf die Gebrauchsdauer des Holzes auswirken kann. Ein Zusammenhang zwischen verschiedenen in Freilandversuchen nachgewiesenen Pilzen und der Befallsintensität ließ sich nicht feststellen. Der Einfluss des dominierenden Fäuletyps (Sukzessionsstadiums) wurde hingegen aufgezeigt.

6 LITERATUR

- Aarseth LI, Hovde PJ (1999) A stochastic approach to the factor method for estimating service life. *Proceedings of the 8th Conference on Durability of Building Materials and Components*, Vancouver, Canada: 1247-1256
- Abu-Tair AI, McParland C, Lyness JF, Nadjai A (2002) Predictive models of deterioration rates of concrete bridges using the factor method based on historic inspection data. Paper 262. *Proceedings of the 9th Conference on Durability of Building Materials and Components*, Brisbane, Australia
- Acker Van J (2003) Service life prediction and creation of a Euro decay index – exterior applications out of ground contact. *Proceedings of COST E22 Workshop*, Zagreb, Croatia
- Acker Van J, Stevens M, Carey J, Sierra-Alvarez R, Militz H, Le Bayon I, Kleist G, Peek R-D (2003). Biological durability of wood in relation to end-use. Part 1. Towards a European standard for laboratory testing of the biological durability of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61: 35-45
- Adachi K, Inoue M, Kawai S (2004) Liquid impregnation into dry wood using a roller-pressing method. II. Effect of specimen size and processing variables on amount of water impregnation. *Mokuzai Gakkaishi* 50: 243-247
- Ammer U (1963) Untersuchungen über das Wachstum von Rotstreifepilzen in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 82: 360-391
- Ammer U (1964) Über den Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit und Holzerstörung durch Pilze. *Holz als Roh- und Werkstoff* 22: 47-51
- Amos GA, Dadswell HE (1948) Siliceous inclusions in wood in relation to marine borer resistance. *Journal of the Council for Science and Industrial Research* 21: 190-196
- Ang G, Groosman M, Scholten NPM (2005) Dutch performance-based approach to building regulations and public procurement. *Building Research and Information* 33: 107-119.

-
- Arndt U, Willeitner H (1969) Zum Resistenzverhalten von Holz bei natürlicher Bewitterung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 27: 179-188
- Augusta U (2007) Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg
- Baecker AAW (1993) A non-pressure method of protection based on hurdle theory to control the spectrum of internal environmental factors which affect the decay of poles in soil contact. Document No. IRG/WP 93-20005. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Baker JM, Miller ER, Morgan JW, Savory JG (1972) Work of the protection division at the Princes Risborough Laboratory. B.W.P.A. Annual Convention, 1972: 1-23
- Banerjee AK, Levy JF (1971) Fungal succession in wooden fence poles. *Material und Organismen* 6: 1-25
- Bauch J (1980) Variation der Holzstruktur aufgrund sekundärer Veränderungen. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH)*, Hamburg, No 131: 96-97
- Bavendamm W (1936) Erkennen, Nachweis und Kultur der holzverfärbenden und holzzersetzenden Pilze. In: Abderhalben, E. (Ed.), *Handbuch Biologische Arbeitsmethoden*, Abt. XII, Teil2/II. Urban & Schwarzenberg Berlin: 927-1134
- Bavendamm W (1974) Die Holzschäden und ihre Verhütung. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart
- Beesley J, Creffield JW, Saunders IW (1983) An Australian test for decay in painted timbers exposed to the weather. *Forest Products Journal* 33: 57-63
- Behrendt CJ, Blanchette RA, Farrell RF (1995) An integrated approach, using biological and chemical control, to prevent blue stain in pine logs. *Canadian Journal of Botany* 73: 613-619
- Blanchette, RA (2005) Environmental factors influencing microbial growth inside the historic expedition hut of Ross Island, Antarctica. *International Biodeterioration and Biodegradation* 55: 45-53

- Blanchette RA, Nilsson T, Daniel G, Abad A (1990) Biological degradation of wood. In: Rowell, RM, Barbour, RJ (Eds.) *Archaeological wood: Properties, chemistry, and preservation*. American Chemical Society, Washington, DC: 141-173
- Blanchette RA, Obst JR, Timell TE (1994) Biodegradation of compression wood and tension wood by white rot and brown rot fungi. *Holzforschung* 48: 34-42
- Böttcher P (1975) Zum Verhalten unterschiedlich feuchtedurchlässiger Anstriche auf einigen einheimischen Holzarten bei natürlicher Bewitterung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 33: 116-120
- Boutelje JB, Hägglund G (1988) Permeability measurements on surface layers for detecting wood with abnormally high permeability. Document No. IRG/WP/2298. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Boutelje J, Nilsson T, Rasmussen S (1986) An analysis of the effects of some factors on the natural durability of pine (*Pinus sylvestris* L.) and spruce (*Picea abies* Karst.). Document No. IRG/WP/1279. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Brischke C, Englund F (2005) Service Life Prediction methods – Outcome of TFPC questionnaire. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Oslo, Norway
- Brischke C, Rapp AO (2005a) Experimental approach for service life prediction of wooden materials. TT6-198. *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France
- Brischke C, Rapp AO (2005b) Relation between lab tests, field tests, and in-service performance and their contribution to SLP. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Oslo, Norway
- Brischke C, Rapp AO (2007) Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufes an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Holzbiologie und Holzschutz, Hamburg: Arbeitsbericht Nr. 2007/2.
- Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO (2006) Detection of fungal decay by high-energy multiple impact (HEMI) testing. *Holzforschung* 60: 217-222

-
- Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO, Augusta U (2007) Dauerhaftigkeit heimischer Holzarten in verschiedenen Gebrauchsklassen & Feuchteschutz durch Hydrophobierung mit vegetabilen Ölen. *Beiträge der 13. Quedlinburger Holzbautagung*, Fachverband Holzbau und Holzschutz Sachsen-Anhalt, Quedlinburg, Germany
- Browne FL (1960) Wood siding left to weather naturally. *Southern Lumberman* 201: 141-143
- Bruce A (1998) Biological control of wood decay. In: Bruce A, Palfreyman JW (Eds.) *Forest Products Biotechnology*, Taylor & Francis, London, Bristol: 250-266
- Bues C-T, Triebel J (2000) Forstgeschichtliche Betrachtungen zur Bedeutung der mondphasenabhängigen Fällzeitregelung in Forstordnungen und anderem forstlichem Schrifttum. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 151: 432-438
- Bürgel J, Horvath E, Haschka J, Messner K (1994) Biological control with *Trichoderma harzianum* in relation to the formation of spores and the production of soluble metabolites. Document No. IRG/WP 94-10073. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Bugos RC, Sutherland JB, Adler, JH (1988) Phenolic compound utilization by the soft rot fungus *Lecythophora hoffmannii*. *Applied and Environmental Microbiology* 54: 1882-1885
- Burmester A (1970) Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren. BAM-Bericht Nr. 4, Bundesanstalt für Materialforschung, Berlin
- Butcher JA (1984) Premature decay of CCA-treated pine posts in horticultural soils - An overview. Document No. IRG/WP/1241. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Carey JK (2000) The COST Euro Index for fungal decay – a progress report. *Proceedings of COST E22 Workshop*, Gozd Martuljek, Slovenia
- Carey JK (2002a) L-joint trials. Part 1: Observations on the process of colonisation and decay. Document No. IRG/WP 02-20250 International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden

- Carey JK (2002b) L-joint trials. Part 2: The relationship between colonisation by decay fungi and long-term performance. Document No. IRG/WP 02-20251. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Cartwright KSG (1941) The variability in resistance to decay on heartwood of homegrown western red cedar (*Thuja plicata* D. Don) and its relation to position in the log. *Forestry* 15: 65-75
- Choi SM, Ruddick JNR, Morris PI (2003) Fungal colonization of CCA-treated decking. Document No. IRG/WP 03-10491. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Clark JW, Scheffer TC (1983) Natural decay resistance of the heartwood of coast redwood *Sequoia sempervirens* (D. Don) Engl.. *Forest Products Journal* 33: 15-20
- Clausen CA (1997) Enhanced removal of CCA from treated wood by *Bacillus licheniformis* in continuous culture. Document No. IRG/WP 97-50083. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Clausnitzer K-D (1990) Historischer Holzschutz. Ökobuchverlag, Stauffen, Freiburg
- Clubbe CP (1980) The colonisation and succession of fungi in wood. Document No. IRG/WP/1107. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- CPD (1988) Council directive of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the member states relating to construction products. 89/106/EEC, Council of the European Communities, Brussels, Belgium
- Creemers J, de Meijer M, Zimmermann T, Sell J (2002) Influence of climatic factors on the weathering of coated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 411-420
- Curling SF, Clausen CA, Winandy JE (2002) Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. *International biodeterioration and biodegradation* 49: 13-19
- Deacon JW (2006) Fungal biology. Blackwell Publishing, Oxford

-
- De Groot RC (1976) Your wood can last for centuries. U.S. Department for Agriculture, Forest Service, Washington
- De Groot RC (1982) An assessment of climate index in predicting wood decay in houses. *Durability of Building Materials* 1: 169-174
- Derbyshire H, Carey JK (2001) Evaluating joinery preservatives: Performance prediction using BS EN 330 L-joint-trials (IP2/01). Watford: BRE
- Despot R, Hasan M, Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO (2007) Changes in physical, mechanical and chemical properties of wood during sterilisation by gamma radiation. *Holzforschung* 61: 267-271
- Dickinson DJ (2005) The factor method in wood preservation – A proposal for future progress from the COST E37 Task Force. *Proceedings of COST E37 5th meeting of Task force "Performance Classification"*, Oslo, Norway
- DIN 68800-3 (1990) Holzschutz im Hochbau. Teil 3: Vorbeugender chemischer Holzschutz.
- Dix NJ, Webster J (1995) Fungal ecology. Chapman and Hall, London
- Doi S, Yamada A (1992) Preventing wood decay with *Trichoderma* spp. *Journal of the Hokkaido Forest Research Institute* 6: 1-5
- Du QP (1991) Einfluss holzartspezifischer Eigenschaften auf die elektrische Leitfähigkeit wichtiger Handelshölzer. Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg
- Du QP, Geissen A, Noack D (1991) The effect of temperature on the electrical resistance of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 49: 305-311
- Duchesne LC, Hubbes M, Jeng RS (1992) Biochemistry and molecular biology of defense reactions in the xylem of angiosperm trees. In: Blanchette RA, Biggs AR (Eds.) *Defense mechanisms of woody plants against fungi*. Springer, Berlin: 133-146
- Duncan J (2005) Performance-based building: Lessons from implementation in New Zealand. *Building Research and Information* 33: 120-127
- Dunleavy JA, McQuire AJ (1970) The effect of water storage on the cell-structure of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) with reference to its permeability and preservation. *Journal of the Institute of Wood Science* 26: 20-28

- Eaton RA, Hale MDC (1993) Wood, decay, pests and protection. Chapman and Hall, London
- Eberhardt TL, Han JS, Micales JA, Young RA (1994) Decay resistance in conifer seed cones: Role of resin acids as inhibitors of decomposition by white rot fungi. *Holzforschung* 48: 278-284
- Edlund M-L (1998) Durability of untreated wood exposed in terrestrial test fields and microcosms. *Material und Organismen* 32: 253-275
- Edlund M-L, Evans FG, Henriksen K, Nilsson T (2006) Testing durability of treated wood according to EN 252 – Interpretation of data from Nordic test fields. Document No. IRG/WP 06-20341. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- EN 113 (1997) Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood-destroying basidiomycetes. Determination of toxic values
- EN 252 (1990) Wood preservatives. Field test methods for determining the relative protective effectiveness in ground contact
- EN 275 (1992) Wood preservatives. Determination of the protective effectiveness against marine borers
- EN 330 (1993) Wood preservatives; field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative for use under a coating and exposed out of ground contact: L-joint method
- EN 335-1 (2006) Durability of wood and wood-based products - Definition of use classes - Part 1: General
- EN 335-2 (2006) Durability of wood and wood-based products - Definition of use classes - Part 2: Application to solid wood
- EN 350-1 (1994) Durability of wood and wood-based products. Part 1: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe. Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood
- EN 350-2 (1994) Durability of wood and wood-based products. Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe

-
- EN 460 (1994) Natural durability of solid wood - Guide to the durability requirements for wood to be used in hazard classes.
- EN 1001-2 (2005) Durability of wood and wood-based products. Part 2: Terminology, vocabulary
- ENV 807 (2001) Wood preservatives - Determination of the effectiveness against soft rotting micro-fungi and other soil inhabiting micro-organisms
- Englund F (2006) How to win friends and influence the market – Service life prediction and performance-based durability assessments of wood products in construction. Document No. IRG/WP 06-20348. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Eriksson K-EL, Blanchette RA, Ander P (1990) Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer, Berlin
- Erler K (2000) Chemische Korrosion von Holz und Holzkonstruktionen. Abschlussbericht. Fraunhofer IRB Verlag, Leipzig
- Feist WC (1982) Weathering of wood in structural uses. In: Meyers R, Kellog R (Eds.) Structural Uses of Wood in Adverse Environment. Van Nostrand Reinhold Company, New York: 156-178
- Fengel D, Wegener G (1989) Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. De Gruyter, Berlin
- Findlay WPK (1966) Ecology of wood-destroying and wood-inhabiting fungi. In: Becker G, Liese W (Eds.) Holz und Organismen, Internationales Symposium Berlin-Dahlem, Heft 1, Duncker & Humblot, Berlin: 199-212
- Fojutowski A (2005) The influence of fungi causing blue-stain on absorptiveness of Scotch pine wood. Document No. IRG/WP 05-10565. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Foliente GC, Leicester RH, Wang C-H, Mackenzie C, Cole I (2002) Durability design for wood construction. *Forest Products Journal* 52: 10 –19
- Foliente GC, Huovila P, Ang G, Spekkink D, Bakens W, Jasuja M (2005) Performance based building R&D roadmap. Performance Based Building Thematic Network PeBBU. Final Domain Report EUR 21988. CIB, Rotterdam

- Francis LP, Norton J (2006) Predicting the decay resistance of timber above ground: 1. Climate effects. Document No. IRG/WP 06-20330. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Gardener JAF, Barton GM (1958) The extraneous component of western red cedar. *Forest Products Journal* 8: 189-192
- Gaylarde C, Ribas Silva M, Warscheid T (2003) Microbial impact on building materials: An overview. *Materials and Structures* 36: 342-352
- Gérardin P, Neyra B, Dumarçay S, Pétrissans M, Serraj M, Huber F (2004) Contribution of gums to natural durability of *Prosopis africana* heartwood. *Holzforschung* 58: 39-44
- Greaves H (1970) The effect of selected bacteria and actinomycetes on the decay capacity of some wood-rotting fungi. *Material und Organismen* 5: 265-279
- Greaves H (1972) Influence of a mixed microbial population on Basidiomycete decay. *Material und Organismen* 7: 11-25
- Greaves H (1977) An illustrated comment on the soft rot problem in Australia and Papua New Guinea. *Holzforschung* 31: 71-79
- Greaves H (2006) How are durability ratings derived and listed for national and imported timbers in Australia. *Proceedings of COST E37 Workshop*, London, United Kingdom
- Green BJ, Tovey ER, Sercombe JK, Blachere FM, Beezhold DH, Schmechel D (2006) Airborne fungal fragments and allergenicity. *Medical Mycology* 44: 245-255
- Gref R, Håkansson C, Henningsson B, Hemming J (2001) Influence of wood extractives on brown and white rot decay in Scots pine heart-, light- and sapwood. *Material und Organismen* 33: 119-128
- Grinda M (1975) Abhängigkeit des Holzabbaues durch Basidiomyceten von der Temperatur. In: Becker G, Liese W (Eds.) *Organismen und Holz*, Internationales Symposium Berlin-Dahlem, Heft 3, Duncker & Humblot, Berlin: 187-196
- Grinda M, Carey J (2004) The COST Euro Index for fungal decay – Five years results. *Proceedings of COST E22 Final Workshop*, Estoril, Portugal

-
- Grosser D (1985) Pflanzliche und tierische Bau- und Werkholzschädlinge. DRW-Verlag, Stuttgart
- Guilley E, Charpentier JP, Ayadi N, Snakkers G, Nepveu G, Charrier B (2004) Decay resistance against *Coriolus versicolor* in Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.): analysis of the between-tree variability and correlations with extractives, tree growth and other basic wood properties. *Wood Science and Technology* 38: 539-554
- Haupt M, Leithoff H, Meier D, Puls J, Richter HG, Faix O (2003) Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L.) – a case study. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61: 473-474
- Hedley ME (1993) Comparison of performance of wood preservatives in laboratory and field tests and in service tests of treated commodities. Document No. IRG/WP 93-20010. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Henningsson B (1967) Interactions between micro-organisms found in birch and aspen pulpwood. *Studia Forstalia Suecica* 53: 1-31
- Hertel H (2005) Inventory on insect test methods. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Oslo, Norway
- Highley TL, Ricard J (1988) Antagonism of *Trichoderma* spp. and *Gliocladium virens* against wood decay fungi. *Holzforschung* 38: 73-78
- Hillis WE (1987) Heartwood and tree exudates. Springer, New York
- Hobbie SE (2005) Contrasting effects of substrate and fertilizer nitrogen on the early stages of litter decomposition. *Ecosystems* 8: 644-656
- Hösli JP, Osuský A (1978) Das Verhalten der verthyllten Randzone von rotker-nigem Buchenholz beim Abbau durch *Coniophora puteana* (Schum.) Fr. und *Trametes versicolor* (L. ex Fr.) Pilat. *Material und Organismen* 13: 51-58
- Holdenrieder O, Greig BJW (1998) Biological methods of control. In: Woodwad S, Stenlid J, Karjalainen R, Hüttermann A (Eds.) *Heterobasidion annosum*: Biology, ecology, impact and control. CAB International, Wallingford: 235-258

- Hovde PJ (2005) The factor method – a simple tool to service life estimation. *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, TT4-115, Lyon, France
- Hovde PJ, Moser K (2004) Performance based methods for service life prediction. State of the art reports. CIB publication No. 294. CIB W080 / RILEM 175 SLM Service Life Methodologies – Task Group Performance Based Methods for service Life Prediction
- Huckfeldt T, Schmidt O (2006) Hausfäule- und Bauholzpilze. Rudolf Müller, Köln
- Huckfeldt T, Schmidt O, Quader H (2005) Ökologische Untersuchungen am Echten Hausschwamm und weiteren Holzfäulepilzen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63: 209-219
- Huovila P (Ed.) (2005) Performance-based building. CIBdf, Rotterdam
- ISO 6241 (1984) Performance standards in buildings – Principles for their preparation and factors to be considered
- ISO 15686-1 (2000) Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 1: General principles
- ISO 15686-2 (2001) Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures
- ISO 15686-8 (2007) Buildings and constructed assets – Service life planning. Reference service life and service life estimation
- Jacquot C (1968) Antagonistic action of bacteria against fungi and its role in the preservation of pulpwood chips. B.W.P.A. Annual Convention 1468: 1-3
- James WL (1968) Effect of temperature on readings of electric moisture meters. *Forest Products Journal* 18: 23-31
- Jellison J, Jasalavich C (2000) A review of selected methods for the detection of degradative fungi. *International biodeterioration and biodegradation* 46: 241-244
- Jennings DH (1987) Translocation of solutes in fungi. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 62: 215-243
- Jennings DH, Lysek G (1999) Fungal biology. Bios, Oxford
- Jernberg P, Lacasse MA, Haagenrud SE, Sjöström C (Eds.) (2004) Guide and bibliography to service life and durability research for building materials

-
- and components. Publication 295. Joint CIB W80/RILEM TC 140 – TSL Committee on Service Life of Building Materials and Components
- Johnson GC, Thornton JD, Saunders IW (1987) An in-ground natural durability field test of Australian timbers and exotic reference species. III. Results after approximately 15 years' exposure. *Material und Organismen* 21: 251-264
- Käärik A (1974) Decomposition of wood. In: Dickinson CH, Pugh GJF (Eds.) *Biology of plant litter decomposition*. Academic Press, New York: 129-174
- Kamdem DP, Pizzi A, Jermannaud A (2002) Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 1-6
- Kasprzyk I, Worek M (2006) Airborne fungal spores in urban and rural environments in Poland. *Aerobiologia* 22: 169-176
- Kollmann F (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer, Berlin
- Kropf FW, Sell J, Feist WC (1993) Vergleichender Bewitterungsversuch mit nordamerikanischen und europäischen Holzanstrichen. Forschungs- und Arbeitsberichte EMPA - Abt. Holz Nr. 115/27
- Kropf FW, Sell J, Feist WC (1994) Comparative weathering tests of North American and European exterior wood finishes. *Forest Products Journal* 44: 33-41
- Lee DH, Takahashi M, Tsunoda K (1992) Fungal detoxification of organoiodine wood preservatives. 1. Decomposition of the chemicals in shake cultures of wood-decaying fungi. *Holzforschung* 46: 81-86
- Leicester RH, Pham L, Foliente GC (1997) Concepts for the development of performance-based building codes and standards. *Proceedings of International Workshop on Performance-Based Design*, Tsukuba, Japan
- Leicester RH, Wang C-H, Nguyen MN, Thornton JD, Johnson G, Gardner D, Foliente GC, Mackenzie C (2003a) An engineering model for the decay of timber in ground contact. Document No. IRG/WP 03-20260. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden

- Leicester RH, Wang C-H, Cookson LJ (2003b) A risk model for termite attack in Australia. Document No. IRG/WP 03-10468. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Leicester RH, Wang C-H, Cookson LJ (2007) A reliability model for assessing the risk of termite attack on housing in Australia. *Reliability Engineering & System Safety*. In press
- Leicester RH, Wang C-H, Nguyen MN, Foliente GC (2005) Engineering models for biological attack on timber. TT4-217. *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France
- Leithoff H, Richter HG, Sulaiman O (2001) Vergleich der natürlichen Dauerhaftigkeit von Teakholz aus mittelamerikanischen Plantagen und von Naturstandorten. Jahresbericht der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg: 52-53
- Levy JF (1982) The place of basidiomycetes in the decay of wood in contact with the ground. In: Frankland J, Hedger JN, Swift MJ (Eds.) *Decomposer Basidiomycetes: Their biology and ecology*. Cambridge University Press, Cambridge: 161-178
- Li G, Nicholas DD, Schultz TP (2007) Development of an accelerated soil-contact decay test. *Holzforschung* 61: 214-218
- Liese W (1959) Die Moderfäule, eine neue Krankheit des Holzes. *Naturwissenschaftliche Rundschau* 11: 419-425
- Liese W (1970) Ultrastructural aspects of woody tissue disintegration. *Annual Review of Phytopathology* 8: 231-258
- Liese W, Peek R-D (1987) Erfahrungen bei der Lagerung und Vermarktung von Holz im Katastrophenfall. *Allgemeine Forstzeitschrift* 42: 909-912
- Lin, RT (1967) Review of the electrical properties of wood and cellulose. *Forest Products Journal* 17: 54-60
- López MJ, Nichols NN, Dien BS, Moreno J, Bothast RJ (2004) Isolation of microorganisms for biological detoxification of lignocellulosic hydrolysates. *Applied Microbiology and Biotechnology* 64: 125-131

-
- Lützkendorf T, Speer T (2005) Alleviating asymmetric information in property markets: Building performance and product quality as signals for consumers. *Building Research and Information* 33: 182-195
- Martínez-Iñigo MJ, Claasen FW, van Beek TA, Lenon G, Sierra-Alvarez R (2000) Evaluation of fungal capacity for detoxification of extractives in Scots pine sapwood. *Environmental Technology* 21: 569-575
- McNamara WS (1994) Soil block versus field test for evaluating and standardizing wood preservatives: A commercial view. Document No. IRG/WP 94-20024. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Metzeler B, Gross M, Mahler G (1993) Pilzentwicklung in Fichtenholz unter Schutzatmosphäre. *European Journal of Forest Pathology* 23: 281-289
- Mieß S (1997) Einfluß des Wasserhaushaltes auf Abbau und Fäuletypen in terrestrischen Mikrokosmen. Diplomarbeit, Universität Hamburg, Hamburg
- Mönck W (1987) Schäden an Holzkonstruktionen. Verlag Bauwesen, Berlin
- Morris PI (2005) Service life prediction based on hard data. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Oslo, Norway
- Morris PI, Dickinson DJ, Calver B (1992) Biological control of internal decay in Scots pine poles: A seven year experiment. Document No. IRG/WP 1529-92. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Morton HL, French DW (1966) Factors affecting germination of spores of wood-rotting fungi on wood. *Forest Products Journal* 16: 25-30
- Nguyen MN, Leicester RH, Wang C-H, Cookson LJ (2007) Probabilistic procedure for design of untreated timber piles under marine borer attack. *Reliability Engineering & System Safety*. In press
- Nicolella M, De Pascale A (2005) Service life of building components. Analysis and proposals of definition of the modifying factors. TT4-180, *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France
- Nilsson T, Daniel G (1990) Decay types observed in small stakes of pine and *Alstonia scholaris* inserted in different types of unsterile soil. Document

- No. IRG/WP/1443. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Nilsson T, Daniel G (1992) On the use of % weight loss as a measure for expressing results of laboratory decay experiments. Document No. IRG/WP 2394-92. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- Nilsson T, Edlund M-L (1995) Laboratory versus field tests for evaluating wood preservatives: A scientific view. Document No. IRG/WP 95-20076. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Nilsson T, Singh AP, Daniel G (1992) Ultrastructure of the attack of *Eusideroxylon zwageri* wood by tunnelling bacteria. *Holzforschung* 46: 361-367
- Nore K, Thue JV, Time B, Rognvik E (2005) Ventilated wooden cladding – a field investigation. *7th Nordic Building Physics Symposium*, Reykjavik, Iceland
- Norén J (2001) Assessment and mapping of environmental degradation factors in outdoor applications. Dissertation, KTH, Stockholm
- Panten H, Schnitzler J-P, Steinbrecher R (1996) Wirkung von Ultraviolettstrahlung auf Pflanzen. *Naturwissenschaftliche Rundschau* 49: 343-346
- Pechmann von H, Graessle E, Wutz A (1964) Untersuchungen über Bläuepilze an Kiefernholz. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 83: 290-314
- Piirto DD, Wilcox WW (1981) Comparative properties of old- and young-growth Giant Sequoia of potential significance to wood utilization. Division of Agricultural Sciences, University of California, Bull. 1901
- Pöhlmann R (2001) Untersuchungen zur Bewitterungsbeanspruchung an einem Objekt in ökologischer Holzbauweise. Diplomarbeit, Universität Hamburg, Hamburg
- Polman JE, Michon SGL, Militz H (1991) Accelerated wood decay in a soil-bed test under greenhouse conditions compared with a stake test under field conditions. Document No. IRG/WP/2384. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden

-
- Preston A, Walchewski P, Archer K, Zahora A, Jin L (2000) The ground proximity decay test method. Document No. IRG/WP 00-20205. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Råberg U, Edlund M-L, Terziev N, Land CJ (2005) Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in Europe – an overview. *Journal of Wood Science* 51: 429-440
- Raczkowski J, Fabisiak E (1987) Effect of gamma radiation on shear strength of pine wood. *Holzforschung und Holzverwertung* 39: 145-148
- Rapp AO (Ed.) (2001) Review on heat treatments of wood. *Proceedings of the special seminar on heat treatments. 09.02.2001 in Antibes, France*. EUR 19885, Office for official publications of the European communities, Luxembourg, Luxembourg
- Rapp AO, Augusta U (2004) The full guideline for the “double layer test method” – A field test method for determining the durability of wood out of ground. Document No. IRG/WP 04-20290. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Rapp AO, Brischke C (2004) The influence of macro and micro climate on decay. *Proceedings of COST E22 Final Workshop*, Estoril, Portugal
- Rapp AO, Berninghausen C, Bollmus S, Brischke C, Frick T, Haas T, Sailer M, Welzbacher CR (2005) Hydrophobierung von Holz – Erfahrungen aus 7 Jahren Freilandtests. *Beiträge der 24. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 157-169
- Rapp AO, Peek R-D, Sailer M (1998) Feuchteverlauf von Holzproben mit und ohne Oberflächenbehandlung während zwei Jahren Freibewitterung. *Beiträge der 21. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 351-369
- Rapp AO, Peek R-D, Sailer M (2000) Modelling the moisture induced risk of decay for treated and untreated wood above ground. *Holzforschung* 54: 111-118
- Rapp AO, Viitanen H, Nilsson T (2002) Natural durability of 4 different *Larix* species tested in soil contact. Document No. IRG/WP 02-10434. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden

- Rayner ADM, Boddy L (1988) Fungal decomposition of wood. Its biology and ecology. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore
- Re Cecconi F, Iacono P (2005) Enhancing the factor method – Suggestions to avoid subjectivity. TT4-172, *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France
- Richter HG (Ed.) (2000) Technology for high quality products from Black locust (*Robinia pseudoacacia*). Final Report INCO COPERNICUS Project No. 96-4114, EU Contract Nr. ERB IC15-CT960713, Hamburg
- Ridout B (2000) Timber decay in buildings. The conservation approach to treatment. E & FN Spon, London
- Roux M-L, Wozniak E, Miller ER, Boxall J, Böttcher P, Kropf F, Sell J (1988) Natural weathering of various surface coatings on five species at four European sites. *Holz als Roh- und Werkstoff* 46: 165-170
- Rydell Å, Bergström M, Elowson T (2005) Mass loss and moisture dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) exposed outdoors above ground in Sweden. *Holzforschung* 59: 183-189
- Rypáček V (1966) Biologie holzzerstörender Pilze. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena
- Sahal N, Lacasse MA (2005) Water entry function of a hardboard siding-clad wood stud wall. *Building and Environment* 40: 1479-1491
- Sailer M, Rapp AO, Leithoff H, Peek R-D (2000) Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitzebehandlung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58: 15-22
- Saunders LDA, Powell MR (2006) The potential for accelerated ageing to determine the persistence of active ingredients in timber. Document No. IRG/WP 06-20323. The International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Scheffer TC (1957) Decay resistance of western red cedar. *Journal of Forestry* 55: 434-442
- Scheffer TC (1971) A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. *Forest Products Journal* 21: 25-31

-
- Scheffer TC (1986) O₂ requirements for growth and survival of wood-decaying and sapwood-staining fungi. *Canadian Journal of Botany* 64: 1957-1963
- Scheffer TC, Hopp H (1949) Decay resistance of black locust heartwood. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 984, Washington D. C.
- Schmidt EL, French DW (1979) Sterilisation method effects on germination of wood decay fungus spores observed by the contact agar method. *Phytopathology* 69: 688-689
- Schmidt H (2005) Vorbeugender baulicher Holzschutz – Außenbereich. In: Müller J (Ed.) Holzschutz im Hochbau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart: 169-187
- Schmidt O (1980) Über den bakteriellen Abbau der chemisch behandelten verholzten Zellwand. *Material und Organismen* 15: 207-224
- Schmidt O (2000) Molecular methods for the characterisation and identification of the dry rot fungus *Serpula lacrymans*. *Holzforschung* 53: 221-228
- Schmidt O (2006) Wood and tree fungi. Biology, damage, protection, and use. Springer, Berlin, Heidelberg
- Schmidt O (2007) Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control. *Mycological Progress*. Published online. DOI: 10.1007/s11557-007-0534-0
- Schmidt O, Dietrichs HH (1976) Zur Aktivität von Bakterien gegenüber Holzkomponenten. In: Becker G, Liese W (Eds.) Organismen und Holz, Internationales Symposium Berlin-Dahlem, Heft 3, Duncker & Humblot, Berlin: 91-102
- Schmidt O, Moreth U (2000) Species-specific PCR primers in the rDNA-ITS region as a diagnostic tool for *Serpula lacrymans*. *Mycological Research* 104: 69-72
- Schmidt O, Müller J (1996) Praxisversuche zum biologischen Schutz von Kiefernholz vor Schimmel und Schnittholzbläue. *Holzforschung und Holzverwertung* 48: 81-84
- Schoeman MW, Webber JF, Dickinson DJ (1994) Chain-saw application of *Trichoderma harzianum* Rifai to reduce fungal deterioration of freshly felled pine logs. *Material und Organismen* 28: 243-350

- Schuhmacher P, Schulz H (1992) Untersuchungen über das zunehmende Auftreten von Innenbläue an Kiefern-Schnittholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 50: 125-134
- Schultz TP, Nicholas DD (2000) Naturally durable heartwood: Evidence for the proposed dual defensive function of the extractives. *Phytochemistry* 54: 47-52.
- Schwantes HO (1996) Biologie der Pilze: Eine Einführung in die angewandte Mykologie. Ulmer, Stuttgart
- Schwarze FWMR, Spycher M (2005) Resistance of thermo-hygro-mechanically densified wood to colonisation and degradation by brown-rot fungi. *Holzforschung* 59: 358-363
- Sell J (1980) Oberflächenbehandlung von Brettschichtholzträgern: Anforderungen, praktische Erfahrungen und Versuchsergebnisse. *Holz-Zentralblatt* 106: 629-630
- Sexton M, Barrett P (2005) Performance-based building and innovation: Balancing client and industry needs. *Building Research and Information* 33: 142-148
- Singh AP, Nilsson T, Daniel GF (1987) Ultrastructure of the attack of wood of two high lignin tropical hardwood species, *Alstonia scholaris* and *Homalium foetidum*, by tunnelling bacteria. *Journal of the Institute of Wood Science* 11: 26-42
- Sjöström C, Trinius W, Chevalier J-L, Jasuja M (2005) Life performance of construction materials and components. Performance Based Building Thematic Network PeBBU Domain 1. Final Domain Report. CIB, Rotterdam
- Skaar C (1964) Some factors involved in the electrical determination of moisture gradients in wood. *Forest Products Journal* 14: 239-243
- Smith RS, Swann GW (1976) Colonization and degradation of Western Red Cedar shingles and shakes by fungi. In: Becker G, Liese W (Eds.) Organismen und Holz, Internationales Symposium Berlin-Dahlem, Heft 3, Duncker & Humblot, Berlin: 253-262
- Smith WB, Yeo HM, Stark C, Morey B, Tascioglu C, Schneider P, Herdmann D, Freeman M (2007) Use of moisture meters with treated wood. Document

-
- No. IRG/WP 07-40382. The International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Stirling R, Morris PI (2006) The influence of extractives on western red cedar's equilibrium moisture content. Document No. IRG/WP 06-40331. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Teischinger A, Fellner J (2000) Alte Regeln neu interpretiert – Praxisversuche mit termingeschlägertem Holz. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 151: 425-431
- Terziev N, Nilsson T (1999) Effect of soluble nutrient content in wood on its susceptibility to soft rot and bacterial attack in ground test. *Holzforschung* 53: 575-579
- Timell TE (1986) Compression wood in gymnosperms. Vol. 1-3. Springer, Heidelberg
- Tjeerdsma BF, Boontsra 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: 149-153
- Trübswetter T (2000) Gefährdung bewitterter Bauteile. *Beiträge der 22. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 83-86
- Vasiliauskas R, Lygis V, Larsson K-H, Stenlid J (2005) Airborne fungal colonisation of coarse woody debris in North-temperate *Picea abies* forest: impact of season and local spatial scale. *Mycological Research* 109: 487-496
- Viitanen HA (1994) Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. *Materials and Structures* 27: 483-493
- Viitanen HA (1996) Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden constructions. Dissertation, The Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala
- Viitanen HA (1997) Modelling the time factor in the development of brown rot decay in pine and spruce sapwood – The effect of critical humidity and temperature conditions. *Holzforschung* 51: 99-106
- Viitanen HA, Ross Gobakken L (2005) Inventory on mould and decay test methods. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Oslo, Norway

- Viitanen HA, Paajanen L, Saranpää P, Viitaniemi P (1997) Durability of larch (*Larix* spp.) wood against brown-rot fungi. Document No. IRG/WP 97-10228. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Viitanen HA, Ritschkoff A-C (1991) Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report No. 222
- Wälchli O (1977) Der Temperatureinfluss auf die Holzerstörung durch Pilze. *Holz als Roh- und Werkstoff* 35: 45-51
- Wälchli O (1980) Der echte Hausschwamm - Erfahrungen über Ursachen und Wirkungen seines Auftretens. *Holz als Roh- und Werkstoff* 38: 169-174
- Wagenführ R, Schreiber C (1985) *Holzatlas*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- Wakeling RN (1992) A study of the decay type potential of seven soils. Document No. IRG/WP 92-1532. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Wakeling RN (2006a) Is field test data from 20 x 20 mm stakes reliable? Effects of decay hazard, decay type and preservative depletion hazard. Document No. IRG/WP 06-20327. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Wakeling RN (2006b) Above and Below-Ground Depletion of Copper, Chromium and Arsenic from *Pinus radiata* and *Fagus sylvatica* at Thirteen Test Sites in New Zealand and Australia. Document No. IRG/WP 06-30402. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Wakeling RN, Singh AP (1993) Premature failure of CCA treated vineyard posts from brown rot. Document No. IRG/WP 93-10016. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Wallace DF, Dickinson DJ (2004) 16S rRNA Analysis of the bacteria associated with biocide degradation. Document No. IRG/WP 04-10543. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Wang C-H, Leicester RH, Nguyen MN (2007) Probabilistic procedure for design of untreated timber poles in-ground under attack of decay fungi. *Reliability Engineering & System Safety*. In press

-
- Ważny J, Krajewski KJ (1984) Jahreszeitliche Änderungen der Dauerhaftigkeit von Kiefernholz gegenüber holzerstörenden Pilzen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 42: 55-58
- Weindling R (1934) Studies on a lethal principle effective in the parasitic action of *Trichoderma lignorum* on *Rhizoctonia solani* and other soil fungi. *Phytopathology* 24: 1153-1179
- Welzbacher CR (2001) Vergleichende Prüfung von umweltfreundlichen, biozidfreien Verfahren zur Vergütung von Holz durch Hitze. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde, Eberswalde
- Welzbacher CR, Heger F, Girardet F, Navi P, Rapp AO (2004) Decay resistance of thermo-hydro-mechanically densified wood. *Proceedings of COST E22 Final workshop*, Estoril, Portugal
- Welzbacher CR, Rapp AO (2003) Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes – durability. Document No. IRG/WP 02-40229. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Westin M, Rapp AO, Nilsson T (2004) Durability of pine modified by 9 different methods. Document No. IRG/WP 02-10434. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Wilcox WW (1977) Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. *Wood and Fiber Science* 9: 252-257
- Willeitner H (1982) Natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes. *Beiträge der 16. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 1-17
- Willeitner H (1984) Pilzresistenz von Buchsbaum und zwei Buchs-Austauschhölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff* 42: 275
- Willeitner H, Schwab E (1981) Holz – Außenverwendung im Hochbau. Alexander Koch GmbH, Stuttgart
- Winandy JE (2001) Thermal degradation of fire-retardant-treated wood: predicting residual service life. *Forest Products Journal* 51: 47-54
- Wong AHH, Morsing N, Henriksen KH, Ujang S (2004) Above ground microbial decay test of biocide treated and untreated wood exposed to Danish and humid tropical climates. Document No. IRG/WP 04-20306. The International Research Group On Wood Protection, Stockholm, Sweden

- Wong AHH, Singh AP (1997) Microbial decay in an extremely durable Malaysian hardwood Belian (*Eusideroxylon zwageri*) - an overview. Document No. IRG/WP 97-10216. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Yu QB, Yang DQ, Zhang SY, Beaulieu J, Duchesne I (2003) Genetic variation in decay resistance and its correlation to wood density and growth in white spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 2177-2183
- Zabel RA, Morrell JJ (1992) Wood microbiology, decay and its prevention. Academic Press, Orlando
- Zürcher E (2000) Mondbezogene Traditionen in der Forstwirtschaft und Phänomene in der Baumbiologie. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 151: 417-424

7 PUBLIKATIONEN MIT REVIEW-VERFAHREN

Der eigene Anteil an den Publikationen ist indiziert.

- Publikation I **Brischke C**, Rapp AO, Bayerbach R (2006) Decay influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering* 1: 91-107¹
- Publikation II **Brischke C**, Rapp AO, Bayerbach R (2007) Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment*. Accepted for publication.¹
- Publikation III **Brischke C**, Rapp AO, Bayerbach R, Morsing N, Fynholm P, Welzbacher CR (2007) Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay: Results from in-situ measurements on buildings. *Building and Environment*. Accepted for publication.¹
- Publikation IV **Brischke C**, Rapp AO (2007) Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field – Observations in different micro-climates. *Wood Science and Technology*. Submitted for publication.¹
- Publikation V **Brischke C**, Rapp AO (2007) Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature, and fungal decay determined for 26 European field test sites. *Wood Science and Technology*. Submitted for publication.¹
- Publikation VI Råberg U, **Brischke C**, Rapp AO, Högberg NOS, Land CJ (2007) External and internal fungal flora of pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) specimens in above-ground field tests

¹ Konzipierung der Arbeit, Literaturrecherche, Versuchsdurchführung, Datenaufnahme und -auswertung sowie publikationsfähige Darstellung

- at six different sites in south-west Germany.
Holzforschung 61: 104-111²
- Publikation VII Rapp AO, **Brischke C**, Welzbacher CR (2006) The influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood and oak heartwood in ground contact. *Wood Material Science and Engineering 2*: Published online. DOI: 10.1080/17480270701273015.³

² Beteiligung an der Konzipierung der Arbeit, der Literaturrecherche, der Versuchsdurchführung und –auswertung (Freilandversuche) sowie an der Diskussion und publikationsfähigen Darstellung.

³ Literaturrecherche, Versuchsauswertung, Diskussion sowie publikationsfähige Darstellung, Beteiligung an der Konzipierung der Arbeit und der Versuchsdurchführung.

7.1 Publikation I: REVIEW ARTICLE: Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products

Wood Material Science and Engineering, Vol. 1: pp. 91-107, 2006 • Copyright © by Taylor & Francis • London.

Wood Material Science and Engineering, 2006; 1: 91–107



REVIEW ARTICLE

Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products

CHRISTIAN BRISCHKE¹, ROLF BAYERBACH² & ANDREAS OTTO RAPP¹

¹*Institute for Wood Biology and Wood Protection, and* ²*Institute for Wood Chemistry and Chemical Technology of Wood, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Hamburg, Germany*

Abstract

The need for a reliable database and a corresponding methodology to predict service life of wood and wood-based products emanates from the European Construction Products Directive, as well as from a strong interest by the building industry. A literature review on decay-influencing factors and on previous approaches to implement methods and tools for service life estimations was the basis for a concept for service life prediction of wooden components. The effect of various indirect decay factors was found to be reducible to a few direct decay factors, with material resistance, as well as wood moisture content, wood temperature and their dynamics among the key factors for fungal decay. Approaches that consider only indirect factors, e.g. climate indices, suffer from poor correlation with service life or decay rates. Therefore, the overall consideration of all possible influences, reduced on the key direct decay factors in first instance, is recommended. To fill a theoretical model with a reliable database, various data sources need to be considered, in decreasing order of priority: in-service performance, field test data, laboratory test data, survey analysis and expert opinion.

Keywords: *Climate index, direct factor, durability, estimated service life, factor method, hazard, indirect factor, multisource model, multistage model, reference service life.*

Introduction

Relevance of service life prediction

The need for research in the field of service life planning and prediction of wood and wood-based products in Europe emanates from the European Construction Products Directive (CPD; Council of the European Communities, 1988) on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the member states relating to construction products. Harmonized standards, and in particular the development of prediction methods, are therefore needed to satisfy the requirements given in Annex I of the CPD, e.g. mechanical resistance, stability and safety in use. Thus, the wood industry, material testing laboratories and wood scientists in general are called upon to deliver reliable data for service life prediction of wood, or suitable methods to produce such data.

Designers, architects, craftspeople, civil engineers and assurance companies have a particular interest in service life prediction. From the operator's point of view a tool is needed that allows the prediction of service life of a wooden component based on information that the operator is able to deliver. In addition to the material-based resistance of a wooden component, the tool should provide information about the influence of the environment on its service life, the possibility of extending its service life by means of protection by design or wood preservation, and the interactions between different components or parts of a whole structure. Therefore, numerous influences, or decay factors, have to be considered and quantified.

This review gives an overview of the most important factors that have an influence on decay, of previous approaches to provide a service life prediction methodology, and of normative references to

Correspondence: C. Brischke, Institute for Wood Biology and Wood Protection, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Leuschnerstr. 91, D-21031 Hamburg, Germany. E-mail: c.brischke@holz.uni-hamburg.de

(Received 13 June 2006; accepted 20 September 2006)

ISSN 1748-0272 print/ISSN 1748-0280 online © 2006 Taylor & Francis
DOI: 10.1080/17480270601019658

CHRISTIAN BRISCHKE¹, ROLF BAYERBACH² & ANDREAS OTTO RAPP¹

¹Institute for Wood Biology and Wood Protection, and ²Institute for Wood Chemistry and Chemical Technology of Wood, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Hamburg, Germany

Abstract

The need for a reliable database and a corresponding methodology to predict service life of wood and wood-based products emanates from the European Construction Products Directive, as well as from a strong interest by the building industry. A literature review on decay-influencing factors and on previous approaches to implement methods and tools for service life estimations was the basis for a concept for service life prediction of wooden components. The effect of various indirect decay factors was found to be reducible to a few direct decay factors, with material resistance, as well as wood moisture content, wood temperature and their dynamics among the key factors for fungal decay. Approaches that consider only indirect factors, e.g. climate indices, suffer from poor correlation with service life or decay rates. Therefore, the overall consideration of all possible influences, reduced on the key direct decay factors in first instance, is recommended. To fill a theoretical model with a reliable database, various data sources need to be considered, in decreasing order of priority: in-service performance, field test data, laboratory test data, survey analysis and expert opinion.

Keywords: Climate index, direct factor, durability, estimated service life, factor method, hazard, indirect factor, multisource model, multistage model, reference service life.

7.1.1 Introduction

Relevance of service life prediction

The need for research in the field of service life planning and prediction of wood and wood-based products in Europe emanates from the European Construction Products Directive (CPD; Council of the European Communities, 1988) on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the member states relating to construction products. Harmonized standards, and in particular the development of prediction methods, are therefore needed to satisfy the requirements given in Annex I of the CPD, e.g. mechanical resistance, stability and safety in use. Thus, the wood industry, material testing laboratories and wood scientists in general are called upon to deliver reliable data for service life prediction of wood, or suitable methods to produce such data. Designers, architects, craftspeople, civil engineers and assurance companies have a particular interest in service life prediction. From the operator's point of view a tool is needed that allows the prediction of service life of a wooden component based on information that the operator is able to deliver. In addition to the material-based resistance of a wooden component, the tool should provide information about the influence of the environment on its service life, the possibility of extending its service life by means of protection by design or wood preservation, and the interactions between different components or parts of a whole structure. Therefore, numerous influences, or decay factors, have to be considered and quantified.

This review gives an overview of the most important factors that have an influence on decay, of previous approaches to provide a service life prediction methodology, and of normative references to durability and service life planning. The principles for service life prediction are discussed and, with reference to this, a concept for wood and wood-based products is provided. Concerning the decay factors discussed, the main focus is on wood degradation by fungi and bacteria.

Terms in use

In general, the quality of components is equated with the durability of a material, which is an undifferentiated point of view. Therefore, one has to define the term “durability”. Following EN 350-1 (1994) and prEN 1001-2 (2005), durability is the “resistance of wood to destruction by wood-destroying organisms”, and natural durability should be understood as the “inherent resistance of wood to attack of wood-destroying organisms”. In contrast, ISO 15686-1 (2000) defines durability not as a material property, but as the “capability of a building or its parts to perform its required function over a specified period of time under the influence of the agents anticipated in service”.

To avoid confusion over terminology, the authors will adhere to the following definition: the durability of wood is its resistance to wood-destroying organisms under the influence of its environment. The resistance to wood-destroying organisms is itself a material-inherent property and is equated to the quality of components (ISO 15686-1, 2000). The term “natural durability” should be used for untreated wood only; in the case of improved durability, e.g. by wood preservation, it should be “durability” or “improved durability”.

Sometimes durability is equated with service life as well, which is an incorrect point of view. In ISO 15686-1 (2000) it is stated that service life is the “period of time after installation during which a building or its parts meets the performance requirements”, where performance is defined as the “qualitative level of a critical property”. Thus, service life is a timespan specifiable in years, but durability is a property that leads to a certain service life, but is influenced by different agents in service. Furthermore, service life ends when a critical property becomes too low to fulfil the performance requirements, e.g. structural safety, serviceability or aesthetic qualities.

7.1.2 Influences on service life

Material quality

Natural resistance to wood-destroying organisms. The resistance to wood-destroying organisms is determined by numerous subfactors, which will be discussed briefly.

The heartwood of many wood species contains extractives, which increase the resistance to fungi, insects and microorganisms (Fengel & Wegener, 1989). For example, several quinones were extracted from the very durable heartwood of *Tectona grandis* L. (Simatupang, 1964). In contrast, the extractive content of sapwood and less durable timbers is very small. Extractives may be toxic or may just influence moisture dynamics, (e.g. resins and lignans) (e.g. Stirling & Morris, 2006). These two aspects are probably combined in more durable wood species. Because the variety of extractives is very large, the influence of the different extractives is hard to quantify. Therefore, the effect of all extractives within one wood species should be seen as a whole.

From many studies it is well known that the content of extractives depends on the position within the tree log, with a resistance gradient from the inner part to the outer part of the heartwood and a maximum at the heartwood periphery (Cartwright, 1941; Scheffer & Hoop, 1949; Gardener & Barton, 1958, 1960; Piirto & Wilcox, 1981; Hillis, 1987; Haupt *et al.*, 2003). Significant differences in resistance to wood-destroying fungi between juvenile and adult wood were found for *Robinia pseudoacacia* L. (Richter, 2000) and *Tectona grandis* L. (Leithoff *et al.*, 2001), among others. Similar observations were made by Willeitner (1982), who described the lower resistance of the intermediate zone between heartwood and sapwood of *Lophira alata* Baenks ex Gaertn. f. The resistance decreases along the log axis (Scheffer, 1957), so that the influence on decay resistance of the position in the cross-section in a log is stronger than that of the position along the log axis.

Reaction wood shows morphologically and chemically distinct characteristics from normal wood and may therefore reveal deviant resistance to decay fungi. Compression wood of gymnosperms was found to be of higher resistance against brown rot and white rot (Timell, 1986; Blanchette *et al.*, 1994). However, Zabel and Morrell (1992) reported a higher susceptibility to fungal attack of tension wood compared with normal hardwood, whereas Blanchette *et al.* (1994) observed similar amounts of decay to those in normal wood. For practical applications, the influence of reaction wood on decay seems to play a minor role.

Besides within-tree differences, the origin of a tree needs to be considered. Differences in resistance for redwood [*Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl.] between “old growth”, the natural origin, and “second growth”, i.e. anthropogenous growth, were reported by Clark and Scheffer (1983). The resistance to marine borers of turpentine wood [*Syncarpia glomulifera* (Sm.) Nied.] was found to be insufficient outside its natural area of circulation (Amos & Dadswell, 1948), because siliceous inclusions were lacking. Rapp *et al.* (2002) and Viitanen *et al.* (1997) found no appreciable influence of provenance on the resistance of larch (*Larix* spp.) heartwood in ground-contact field tests and laboratory resistance tests against basidiomycetes. There is no known general correlation for all wood species between provenance and resistance to wood-destroying organisms.

The time of felling, in combination with phases of the moon, as a critical issue for the determination of the resistance of wood against organisms, as well as other wood properties, has been discussed in the literature for many years (Ważny & Krajewski, 1984; Clausnitzer, 1990; Bues & Triebel, 2000; Teischinger & Fellner, 2000; Zürcher, 2000). In laboratory tests, winter-felled pine wood showed a higher resistance against *Coniophora puteana*, *Stereum hirsutum* and *Chaetomium globosum* than wood felled in summer (Ważny & Krajewski, 1984), but no significant dependence on moon phases was observed. In contrast, Boutelje *et al.* (1986) found no difference in resistance between summer- and winterfelled pine and spruce wood against fungal decay and house-longhorn beetle. However, the time of felling has to be distinguished from the storage conditions in the particular season. Lower fungal activity in winter positively affects the durability of wood, but is not part of the material-inherent resistance of wood.

Storing, drying and steaming may be seen as treatments in a broader sense, but are not normally carried out to improve the resistance of wood. Nevertheless, these processes have the potential to change the resistance of wood. Bavendamm (1974) reported on the loss of termite resistance of *Chlorophora excelsa* (Welw.) Benth. after 20 years' storage at room temperature. Terziev and Nilsson (1999) showed an increase in mass loss by soft rot-causing fungi in soil contact in a surface-close layer, which was rich in

soluble nutrients, compared with deeper layers of Scots pine after kiln-drying. Steaming of *Robinia pseudoacacia* L. also led to decreased resistance (Richter, 2000).

Wood species of high density do not inevitably have higher resistance to wood-destroying organisms. Heavy wood species such as *Fagus sylvatica* L., *Buxus sempervirens* L. and *Gossypiospermum praecox* (Griseb.) P. Wilson suffer from very low resistance against fungi (Willeitner, 1984). Furthermore, no correlations between density within one wood species and its resistance, or natural durability, were found by Edlund (1998), Yu *et al.* (2003), Guilley *et al.* (2004) or Rydell *et al.* (2005).

In describing the influence of density on the resistance of wood against wood-destroying organisms, two different points of view have to be distinguished. In fungal resistance tests the most common measure is weight loss by fungal attack, which can be expressed absolutely in grams or as a percentage (Nilsson & Daniel, 1992), where the absolute weight loss is a measure of fungal activity (how much wood substance the fungus was able to metabolize) and the percentage weight loss is a measure of the remaining wood substance or the remaining strength of a wooden component. When comparing wooden materials of different density in terms of their resistance, the absolute weight loss should be considered. Welzbacher (2001) found no significant differences in absolute weight loss by *Coriolus versicolor* between undensified *Picea abies* Karst. (0.41 g cm^{-3}) and densified *P. abies* (1.20 g cm^{-3}), but higher weight losses were obtained for densified *P. abies* by *Coniophora puteana* and *Poria placenta* compared with undensified controls (Welzbacher *et al.*, 2004). Schwarze and Spycher (2005) supported these results for three different brown rot-causing fungi. Artificially increased density does not lead to increased resistance against fungi, because not only is fungal growth restricted by the occlusion of tracheid lumina, but also cell-wall structures are mechanically stressed and microcracks and microcapillaries occur, leading to higher accessibility after remoistening in durability tests (Adachi *et al.*, 2004).

Tylosis reduces the permeability and accessibility of wood, so that moistening is hampered. Although some very durable wood species, e.g. *Robinia pseudoacacia* L., show tylosis, the formation of tylosis does not inevitably lead

to higher resistance, e.g. the non-durable facultative heartwood of beech (*Fagus* spp.) (Hösli & Osusky, 1978; Bauch, 1980).

Technically improved resistance to wood-destroying organisms. The durability of wood can be improved by many different techniques, so that the resistance of wood to wood-destroying organisms no longer relies solely on natural wood properties. Chemical wood preservation aims at the inhibition of attack by wood-destroying organisms, with special regard to non-durable sapwood. Therefore, toxic substances are usually applied for impregnation. Improvement to “very durable” (EN 350-1, 1994), which means a prolongation of service life by a factor of at least five compared with untreated non-durable wood, is possible, provided that the type of wood preservative matches the attacking organisms, a sufficient retention level is achieved, and the active ingredients are well penetrated, distributed and fixed. Greaves (1977) reported on the meaning of uniform penetration and microdistribution to cell-wall level for effective wood preservation. His investigations of transmission poles in Australia treated with Copper Chromium Arsenic (CCA) showed that poor preservative distribution can lead to premature failure, even if adequate retention and fixation of the preservative are obtained, e.g. soft rot decay pockets were observed, although a layer of toxicants was formed on the tertiary cell walls, as the secondary wall was untreated. Another reason for prematurely failing components is the leaching of inadequately fixed active ingredients, particularly occurring in contact with ground or water (e.g. Greaves, 1977; Leicester *et al.*, 2005).

To avoid the use of harmful substances with respect to human health and the environment, non-biocidal improvement processes have been developed and established in recent years (e.g. Burmester, 1970; Tjeerdsma *et al.*, 1998; Sailer *et al.*, 2000; Rapp, 2001; Kamdem *et al.*, 2002; Welzbacher & Rapp, 2003; Westin *et al.*, 2004). Different hydrophobation and wood-modification processes have the potential to improve the resistance of wood by a factor of at least five.

Coatings reduce photodegradation by absorbing ultraviolet (UV) light. Furthermore, the water uptake of wood is reduced, which inhibits the attack of fungi. The effectiveness of paints is very varied and also depends on

maintenance (Feist, 1982). Opaque-pigmented formulations are needed to guarantee UV absorption and only thick-film paints lead to effective moisture protection (Kropf *et al.*, 1994). However, insufficient maintenance will have the opposite effect: as a result of defective coatings, water will be taken up, so that desorption is hindered and moisture accumulation occurs (Derbyshire & Carey, 2001).

The interdependences between different species of wood-destroying and staining fungi for biological wood protection in terms of antagonistic or synergistic effects have been investigated in many cases. Inhibition of rot fungi by the mould fungus *Trichoderma* sp. has been proved by several authors (Highley & Ricard, 1988; Doi & Yamada, 1992; Morris *et al.*, 1992; Bürgel *et al.*, 1994; Schoeman *et al.*, 1994). No commercial uses for these biological protection methods have yet been realized.

To summarize, the resistance of wood in terms of a natural or artificially improved material property is the most investigated influence on service life. Nevertheless, owing to its complexity in terms of numerous subinfluences and interactions with environmental influences, more detailed information on different resistance aspects is needed to predict the service life of wood.

Design level

Wood protection by design is the most important step towards effective wood protection. The different design details of a building or the parts of a building indirectly affect the service life of wood, because they determine the hazard level. Wood decay is affected by wood temperature and wood moisture content, which can become critical if the design level is low. The durability of a wooden component or commodity depends on its use conditions or hazard. To achieve less severe conditions, one must avoid moistening, water traps and moisture nests. Therefore, the distance to the ground, roof overhangs, shading, declinations and other design details must be considered (e.g. Schmidt, 2005).

The dimension of a component also affects the risk of decay. Willeitner (1982) reported on higher weight losses for shorter test specimens in laboratory resistance tests. Results from field tests (Sell, 1980) showed a higher decay risk for components with larger dimensions. According to Sell, the low thermal and

moisture conductivity of wood leads to high moisture gradients close to the surface. Deformation of small-dimensioned components, and formation of cracks in large-dimensioned components result from hindered swelling and shrinking. These observations were not confirmed by Augusta *et al.* (2004).

A conflicting effect occurs when wood is exposed in ground contact, in that leaching of wood ingredients or wood preservatives, and superficial degradation by bacteria, affect larger specimens less than smaller ones (Leicester *et al.*, 2005).

The formation of cracks, which are entry ports for water and fungal spores, and the risk of long-term moistening, are critically influenced by shading (by trees, the building itself or other buildings) and orientation (weather aspect).

Work execution level

The work execution level is a typical indirect influence on service life, but is non-specific for wood. In wooden constructions or buildings the main problem is the formation of water traps, which may be generated by leaky insulation, missing end grain sealing, open joints or damage during installation. Within a concept for the service life of wood, this factor will be considered by the direct decay factors wood temperature and wood moisture content.

Indoor and outdoor environment

Abiotic environmental influences on wood are qualitatively the same for indoor and outdoor applications, and therefore are reviewed together. The resistance of wood to exterior mechanical loads is defined by moduli of elasticity, Poisson ratios and different strengths. Further loads can occur inside the wood caused by swelling, shrinkage or thermal expansion. In combination with the anisotropy of wood, these interior loads can lead to deformation and cracks. Furthermore, wood is a viscoelastic material and its mechanical properties are influenced by time. However, neither exterior and interior loads, as long as the requirements from structural analysis are considered, nor the decrease in strength over time, as long as biological decay is excluded, will lead to a reduction in the service life of wooden components (Browne, 1960; De Groot, 1976). Therefore, mechanical agents have to be considered as an indirect influence on decay.

Electromagnetic agents, e.g. photodegradation by sunlight, may influence the formation of cracks and the water accessibility of wood, which indirectly influences the decay of wood. Although strength losses by ionizing irradiation were observed by Raczkowski and Fabisiak (1987), the necessarily high doses do normally not occur in real life. The influence of thermal agents becomes substantial when wood is exposed to higher temperatures for a long time, in terms of reduced strength properties (Mönck, 1987; Winandy, 2001). In addition, the formation of cracks and thermal deformation have to be considered. Therefore, thermal agents directly and indirectly influence the service life of wood.

Corrosion of wood by aggressive media was observed at $\text{pH} < 2$ or > 11 (Kollmann, 1951). Within this range wood is inert and long-term exposure is needed to detect changes in wood in terms of degradation of cell-wall components, leaching of ingredients or mechanical destruction of the wood structure by crystallization pressure. The destructive action starts on the wood surface and only slowly proceeds towards the inner part of the wood (Erler, 2000).

Apart from extreme situations, the direct influence of mechanical, electromagnetic, thermal and chemical agents on the service life of wood can be compensated for by making components with reasonable dimensions, whereas their indirect influence on biotic decay factors must be considered.

Biotic influences

Fungi and bacteria. There is a distinction between wood-discolouring fungi, such as mould or blue stain fungi, and wood-destroying fungi, such as fungi causing white rot, brown rot or soft rot. In contrast to white-rot fungi, which are able to degrade cellulose and lignin, brown rot- and soft rot-causing fungi predominantly degrade cellulose. Taxonomically, brown-rot fungi belong to the basidiomycetes; most white-rot fungi are also basidiomycetes, but some of them are ascomycetes (Eriksson *et al.*, 1990; Schmidt, 2006). Soft rot-causing fungi are ascomycetes and deuteromycetes (Schmidt, 2006).

The interdependence between different species, such as wood-destroying fungi, wood-non-destroying species, and bacteria, has been the object of many

studies. Both synergistic (Henningsson, 1967; Schmidt, 2006) and antagonistic effects (e.g. Weindling, 1934; von Pechmann *et al.*, 1964; Doi & Yamada, 1992; Bürgel *et al.*, 1994) have been observed. In many cases numerous species are involved in the degradation of wood, and antagonisms and synergisms determine a succession of wood fungi, where wood-destroying fungi often follow primary wood colonizers, which do not destroy the wood themselves (Henningsson, 1967; Schmidt, 2006). The damage (decay) caused by bacteria is minor compared with that caused by basidiomycetes, but bacteria are able to survive and degrade under much more severe conditions than most fungi (e.g. Butcher, 1984; Singh *et al.*, 1987; Nilsson *et al.*, 1992; Clausen, 1997; Wong & Singh, 1997). Therefore, bacteria may be the first colonizers of wood and act as non-target organisms or pathfinders for the wood-destroying fungi that follow.

Presence of species. The presence of certain species directly determines the potential of infestation by even those species. Wilcox and Dietz (1997) found that fungi primarily responsible for above-ground decay are the same species present in the wood used to build structures of green lumber. Although it is assumed that fungal spores are ubiquitous, the frequency of spores obviously differs between urban sites and the margins of a forest. Therefore, studies on the occurrence of certain species are helpful to detect routes of infection and differences in the inoculum potential at different sites. Promising approaches and modern techniques already exist; for example, serological and molecular methods for the detection of fungi (e.g. Jellison & Jasalavich, 2000; Schmidt, 2000; Schmidt & Moreth, 2000; Råberg *et al.*, 2005) could result in a better understanding of species distributions or colonization patterns. Nevertheless, the influence of a species' presence and its inoculum potential on the decay rate, and therefore on the service life of wooden components, is questionable, e.g. Carey (2002a, b) found only very poor correlation between the time when decay fungi were detected on specimens and the onset of decay in different L-joint trials in the UK.

A small loss of mass, which occurs when decay fungi metabolize wood substance, inevitably provokes substantial strength loss of wooden components. The ratio between mass loss and strength loss depends on the

type of rot and the preferentially degraded cell-wall components, respectively (Wilcox, 1977; Curling *et al.*, 2002; Brischke *et al.*, 2006). The effect of wood-discolouring fungi and mould on wooden components is restricted to aesthetic aspects. Thus, their influence on service life strongly depends on performance requirements.

Nutrients. The availability of nutrients may be a limiting factor for fungal growth. Discolouring fungi use sugars and starch as a carbon source; whereas mould fungi penetrate only a few millimetres of the wood substance, blue stain fungi colonize the whole nutritious wood (Schmidt, 2006). Wood-destroying fungi mainly draw nourishment from cell-wall components. Fungal growth may be determined by the availability of soluble sugars (Terziev & Nilsson, 1999), nitrogen (Schmidt, 2006), some trace elements and vitamins (Schwantes, 1996). Assuming that fungal spores are ubiquitous, one or more species will always be able to infest wood, independently of the actual nutrient combination. Higher nutrient contents, e.g. in ground contact, may cause infestation by other species, but the influence of nutrients is mostly overridden by other factors, e.g. more constant moisture conditions in ground contact.

pH value. Most wood species have pH values between 3.3 and 6.4, and heartwood usually shows lower pH values than sapwood (Wagenführ & Schreiber, 1985; Fengel & Wegener, 1989). Wood-degradative fungi can tolerate pH values between 2 and 8, but the most relevant fungal species prefer pH levels between 5 and 6 (Bavendamm, 1974). Thus, the influence of pH values on decay and the service life of wood seems negligible, apart from extreme acidic and alkaline conditions.

Wood moisture content. The wood moisture content, depending on air humidity, precipitation and water uptake by means of ground contact or leakage, appears to be one of the decisive decay factors. Fungal growth is very closely related to the potential for water uptake by the fungus itself. The mycelium is not able to absorb water, which is bound within the cell walls, and so the minimum moisture content for fungal decay has to be even above the fibre saturation point

(Schmidt, 2006). Otherwise, the enzymes that are released by the fungus, and which are responsible for the decomposition of the cell-wall components, will not be transported and are therefore inactive. The partial vapour pressure inside the substrate is a measure of the amount of moisture that is disposable for the fungus, and is usually expressed as the water activity, a_w . The water activity depends on chemical composition, temperature and pH of the substrate. The a_w -minimum for most of the wood-destroying basidiomycetes is 0.97. Below $a_w=0.60$ xerotolerant mould species are not able to grow (Schmidt, 2006). Viitanen (1996) and Schwantes (1996) reported on the interrelationship between moisture minima and temperature: the more the temperature deviates from the optimum, the higher the a_w values needed for mycelium growth.

For practical purposes, minima and maxima for fungal growth are expressed by the wood moisture content (MC). Ammer (1963) found the minimum at MC=30%, and the optimum MC for the most relevant basidiomycetes is between 40 and 70% (Wälchli, 1980). One remarkable exception to this rule is *Serpula lacrymans*, which can transport water over longer distances to the location of enzymic activity (Wälchli, 1980; Grosser, 1985). Therefore, *S. lacrymans* is able to grow on wood with less than 20% MC, provided that an external moisture source exists (Schmidt, 2006). The upper moisture limit for most basidiomycetes is 90% MC (Bavendamm, 1974), but some fungi have higher moisture maxima, e.g. *Gloeophyllum abietinum*. A wide-ranging moisture optimum was observed for blue stain fungi (MC=40-130%) and red streakiness-causing fungi (MC=50-120%) (Schuhmacher & Schulz, 1992; Schmidt, 2006). The upper moisture limit should be seen as an indirect limitation by the oxygen content. Survival and growth of most fungi without oxygen for a long period is restricted: *Coniophora puteana* survived for 7 days and *S. lacrymans* for 2 days (Bavendamm, 1936), but *Laetiporus sulphureus* survived for more than 2 years (Scheffer, 1986). The higher the moisture content of wood, the lower the air content. The minimum air content for fungal decay is between 10 and 20 vol% (Rypáček, 1966). Therefore, fungal infestation is temporarily preventable by wet storage (Liese & Peek, 1987), as well as by foil storage (Metzeler *et al.*, 1993), which leads to a total respiration of the residual oxygen by still living parenchyma cells. Soft rot-causing fungi, which are able to attack water-

saturated wood, e.g. in cooling towers, receive necessary oxygen for the decay by the sprinkling effect of the water, which provides oxygen in solution (Schmidt, 2006).

The outstanding relevance of the direct decay factor “wood moisture content” has been pointed out in many studies on the durability of wood and wood-based products (e.g. Viitanen & Ritschkoff, 1991; Rapp *et al.*, 2000; Rydell *et al.*, 2005), and is fixed in different standards (e.g. EN 335-1, 1992; EN 335-2, 1992; EN 460, 1994).

Wood temperature. Wood temperature is the second most important influence on fungal activity. In general, the minimum temperature is 0°C, because no liquid water is available in hyphae, provided that the freezing point is not lowered by a modified chemical composition of the hyphae or the wood. The optimum temperatures for fungal activity are strongly dependent on the species, but range between 20 and 35°C (Wälchli, 1977). Studies on the influence of wood temperature, not air temperature, on decay rates in the field are rare, but comparison of different sites in terms of their average air temperature shows a tendency for shorter service lives at warmer locations (Beesley *et al.*, 1983; Augusta *et al.*, 2004; Grinda & Carey, 2004).

Climatic conditions. In different studies (e.g. Beesley *et al.*, 1983; Creemers *et al.*, 2002; Grinda & Carey, 2004; Augusta *et al.*, 2004) the strong influence of precipitation and air temperature on the decay rates in field durability tests was shown, but no strong correlation between one of these parameters and the service life of the test specimens was obtained. Scheffer (1971) assumed that the duration of rainfalls is a more crucial factor than the rainfall sum. Laboratory test results from Viitanen (1996) and field test results from Rapp and Brischke (2004) revealed that less fluctuating temperature conditions lead to higher decay rates. Thus, the constancy of environmental influences, especially moisture and temperature, seems to be a key decay factor.

In-use conditions

The dimension of the factor “in-use conditions” is difficult to estimate, because extensive statistical studies are needed to quantify wear, vandalism, use frequencies and use intensities, which are examples of the numerous influences condensed in this factor. Furthermore, the in-use conditions are not related to biological durability and therefore are not considered in detail in this review.

Maintenance level

The service life of wood is theoretically infinitely increasable, if suitable maintenance measures, e.g. repainting or replacement of protective construction elements, are undertaken. In the absence of maintenance, service life can be reduced (Derbyshire & Carey, 2001), e.g. defective coating films lead to moisture accumulation and a higher decay risk. Depending on the type of protection system to be maintained, the influence of the maintenance level can be very important. Plenty of maintenance measures are conceivable, but cannot be presented here at length.

7.1.3 Approaches for service life prediction

Previous approaches to predict the service life of wooden components are very heterogeneous in considering the different decay influences. In the following, different approaches will be discussed, from pure material-based resistance testing, through taking more and more environmental aspects into consideration, to an overall modelling approach.

Relationship between hazard and durability classes

The hazard of biological attack for different exposure conditions is classified in EN 335-1 (1992) according to the occurrence of wood-destroying organisms, which depend on soil contact and the moistening regime. Five hazard classes are distinguished (Table 7.1-1), in which the term “hazard class” will be replaced by “use class” in the near future. In addition, EN 335-2 (1992) contains more detailed information about the moistening regime in solid wood in the different hazard classes. From this standard it becomes obvious that the higher the hazard in terms of wetting, soil contact and seawater contact, the

shorter the estimated service life. A guideline for service life prediction is not given by EN 335 (1992).

Table 7.1-1. Use conditions and moistening regime in different hazard classes after EN 335-1 (1992) and EN 335-2 (1992).

Hazard class	Use conditions	Moistening regime
1	no soil contact, covered, dry	max. 20% MC
2	no soil contact, covered, risk of wetting	temporarily >20% MC
3	no soil contact, not covered	frequently >20% MC
4	soil contact or fresh water contact	permanently >20% MC
5	sea water contact	permanently >20% MC

Note: MC = moisture content.

Guidance for classification of wood into durability classes is given by EN 350-1 (1994). Note that durability in this standard should be understood as resistance. The classification is based on the x-value, which is the relative service life of a stake in ground contact (EN 252, 1990) or the relative weight loss of a specimen (EN 113, 1997) compared with pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) controls. Five classes are distinguished for durability against wood-destroying fungi and microorganisms (Table 7.1-2). Durability classes for selected wood species are given by EN 350-2 (1994), but the classification is not inevitably transferable to all hazard classes or use conditions (Van Acker *et al.*, 2003; Augusta *et al.*, 2004).

Table 7.1-2. Durability classes with description after EN 350-1 (1994) and examples (EN 350-2, 1994).

Durability class	Description	Examples
1	very durable	Makoré, Doussié, Teak, Mansonia
2	durable	Sweet chestnut, Cedro, European oak, Bangkirai
3	moderate durable	Douglas fir, Pitch pine, Sapelli
4	less durable	Fir, Norway spruce
5	non durable	Maple, European beech, European ash

Finally, EN 460 (1994) should provide guidance on the durability requirements in different hazard classes. The use of wood species of certain durability (EN 350-2, 1994) is recommended for different hazard levels depending on the type of wood-destroying organisms occurring. Furthermore, the influence of component dimension and protection by design is touched upon, but their influence on service life is not quantified. According to this standard, service life estimations should be done by comparing different wood species and

components in terms of their durability and service lives only. Thus, the relationship between hazard and durability does not consider the influence of climatic influences in general and does not give guidance to service life prediction in particular.

Climate-based decay indices

The climate index presented by Scheffer (1971) was the first attempt to correlate climatic data with the hazard for decay. The hazard potential of different climates in the USA was calculated by empirically determined decay intensity from field tests at four different sites, in which the focus was on temperature and distribution of rainfall:

$$\text{Climate Index} = \frac{\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dec}} [(T - 35)(D - 3)]}{30}$$

where $\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dec}}$ is the sum of the months January to December, T is mean day-temperature of the month (°F), and D is mean number of days with more than 0.001 inch of rain per month.

The higher the climate index, the higher the hazard for decay of wood. The index ranges from 0.0 for Yuma, Arizona, to 137.5 for West Palm Beach, Florida, for the continental part of the USA, where three index zones represent three levels of above-ground decay potential. The inaccuracy of the Scheffer climate index was later pointed out by De Groot (1982), Norén (2001) and others. Additional factors, e.g. construction details and mesoclimatic and microclimatic influences, have to be considered. The database used for the development of this climate index seems to be insufficient, and the approach is oversimplified for the prediction of service life of wooden components.

A study by Beesley *et al.* (1983) aimed to rank a number of Australian sites for the severity of their above-ground decay hazard and to relate this hazard to some elements of climate. Painted wood samples were exposed to the weather at 27 different sites in Australia and Papua New Guinea for 3 years. The comparison of decay ratings with climatic variables failed to establish a strong correlation, and the correlation between the Scheffer climate index and the

incidence of decay was also weak. It was recommended that any attempt to assess the performance of a material should be related to the conditions prevailing during the exposure period, rather than to long-term averages, because indices derived from shorter term climate data, which corresponded to the exposure period, differed significantly from indices obtained from longer term average data.

In 1997 a group of European experts on wood preservation, gathering in COST Action E2 (“Wood durability”), initiated a round-robin test to develop a European equivalent to the Scheffer index (Carey, 2000; Van Acker, 2003; Grinda & Carey, 2004). Results from different durability field tests, which were performed by 17 partner institutions in Europe and one in the USA (test site at Hilo, Hawaii), should lead to a “COST Euro Index for fungal decay” in out-of-ground conditions. Although significant differences in decay intensity between the test sites were observed, decay intensity and macroclimatic data did not correlate well, owing to the approach being as rough as the Scheffer climate index (Grinda & Carey, 2004).

The transfer of data from field tests from one location to another is difficult because of climatic differences between sites, which makes natural weathering test methods hard to evaluate. The relationship between weathering results and meteorological conditions was investigated by Creemers *et al.* (2002) for coated wood, but a very poor correlation was found between a climatic index and the weathering results for all tested materials. Therefore, the use of an “internal comparison product (ICP)” was recommended to achieve reasonable correlation. The outcome of older studies on wood coatings and stains (Kropf *et al.*, 1993, 1994; Roux *et al.*, 1998), which aimed to compare different locations, suffered from too small differences between the test sites.

From previous attempts to correlate macroclimatic data with decay rates, cited above, it may be gathered that more influences or even more detailed influences on wood decay have to be considered to obtain closer relationships between the outdoor environment and service life of wood.

Factor method

A methodology for service life planning is given in ISO 15686, and the core of this procedure is the factor method (ISO 15686-1, 2000). The method is named according to the calculation of an estimated service life (ESL) by multiplication of a reference service life (RSL) with different modifying factors (Table 7.1-3), which consider the deviation of influences from reference conditions:

$$ESL = RSL + A + B + C + D + E + F + G$$

Table 7.1-3. Modifying factors for calculation of an estimated service life according to the factor method (ISO 15686-1, 2000) with examples related to wood-based products (added by the authors).

Modifying factor	Description	Examples related to wood-based products
A	Quality of components	resistance to wood-destroying fungi, wood preservatives
B	Design level	protection by design, roof overhangs
C	Work execution level	joints, capillary gaps
D	Indoor environment	temperature, relative humidity (RH), condensation
E	Outdoor environment	climate, driving rain, shadow
F	In-use conditions	wear, mechanical impacts
G	Maintenance level	revisions, repainting

The factor method takes many more influences into account compared with the Scheffer climate index, which considers only the factor E in terms of precipitation and temperature. The factors D and E are worth regarding in particular, because they incorporate all biotic and abiotic agents that influence wooden components indoors and outdoors. Degradation agents affecting the service life of building components are specified in ISO 6241 (1984) and subdivided into mechanical, electromagnetic, thermal, chemical and biological agents (Table 7.1-4). These five agents will then be incorporated in the factor method as factors E₁-E₅ or D₁-D₅.

Table 7.1-4. Degradation agents affecting the service life of building components (according to ISO 6241, 1984).

Nature	Class	Examples related to wood exposed outdoors
Mechanical agents	Gravitation, forces and imposed or restrained deformations, kinetic energy, vibrations and noises	Snow and rain loads, pressure by ice-formation, thermo- and hygroexpansion, daily differences in temperature, freezing/melting, driving rain
Electromagnetic agents	Radiation, electricity, magnetism	Solar and thermal radiation
Thermal agents	Extreme levels or fast alterations of temperature	Heat and frost
Chemical agents	Water and solvents, oxidising agents, reducing agents, acids, bases, salts, chemically neutral	Water, oxidising agents (oxygen, ozone, carbon dioxide, sulphur dioxide, nitrogen oxides), synergistic effects of oxidising agents, acids, salts, sea water, sooty particles, chemical incompatibilities (leaching, solvents, contaminated soils)
Biological agents	Vegetable and microbial, animal	Fungi, bacteria, insects, marine borers

The definition of service life as “period of time after installation, during which a building or its parts meet the performance requirements”, as well as the approach to consider all conceivable agents within the factor method, both given by ISO 15686-1 (2000), seem to be reasonable and a suitable basis for modelling the service life of wooden components.

Multisource models

Extensive research on modelling fungal decay and termite attack has been conducted in Australia (Foliente *et al.*, 2002; Leicester *et al.*, 2003a, b; 2005), taking different data sources into consideration. A preliminary model for termite attack was developed on the basis of opinions elicited from experts on termite behaviour, and then calibrated using data on 5000 houses from an Australia-wide survey (Leicester *et al.*, 2003b). A second preliminary model was developed for decay of timber in ground contact by analysing data obtained from 5000 in-ground stakes placed at five different Australian sites over a period of 30 years (Leicester *et al.*, 2003b). The tests comprised untreated timber of 77 species and timber of two species treated with CCA and creosote. This model was calibrated and modified by examination of full-sized structures, and extended by the effects of maintenance activities and diffusion paste bandages. Finally, a model for decay in above-ground conditions was developed, also initially based on the use of existing long-term data, and later calibrated by information obtained from in-service structures and by expert opinion (Leicester *et al.*, 2005). For all three models, data from different sources were used, an

open approach was chosen to supply additional information later on, and user-friendly software was developed. Furthermore, climate indices were calculated to provide the mapping of hazard zones for decay, termite and marine borer attack in Australia. The climate indices took annual rainfall, mean annual temperature and the number of dry months into consideration, but suffered from poor correlation with the decay rates obtained in field tests. The hazard zone mapping was therefore adopted by expert opinion.

7.1.4 Concept for service life prediction

Classification of decay-influencing factors

We propose a distinction between direct and indirect influences. A distinction can be made between direct and indirect influences on decay. When classing biological decay of wood in a system of dose-response relationships, wood decay is the response to a combination of doses by different influencing factors. Certain importance is attached to the numerous decay-influencing factors, where the term “factor” should not be understood as a mathematical expression, but rather as a variable to be considered. The different factors have a direct or an indirect effect on decay, and the indirect factors determine the direct ones. For example, the wood moisture content has a direct influence on the service life of a wooden component, whereas the roof overhang of a building has no direct influence. In this case, the indirect influence of the roofing results from the limited moisture stress by driving rain. Climate and construction criteria are indirect decay factors. Besides material-inherent properties (natural and improved resistance), wood temperature, wood moisture content and the presence of certain species of wood-degrading organisms are the strongest direct factors, which can be seen in the classification scheme for decay-determining factors (Table 7.1-5).

Table 7.1-5. Classification scheme for decay-influencing factors.

Indirect factors	Direct factors	
	Exogenous factors (environmental influences)	Endogenous factors (material inherent resistance)
Climate	Presence of species	Natural resistance
Air temperature	Decay types	Wood species
Precipitation	Degradation mechanisms	Extractives
Wind	Inoculum potential	Position in the log
Relative humidity	Wood temperature	Juvenile/adult wood
Construction/design	Dynamics of conditions	Provenience
Dimension	Wood moisture content	Felling time
Shadow	Dynamics of conditions	Storage, drying , steaming
Distance to ground	Nutrients	Density
Orientation	Relationship between organisms	Tylosis
Roofing		Improved resistance
		Type of wood preservative
		Retention of wood preservative
		Penetration/distribution of wood preservative
		Wood modification
		Hydrophobation
		Coatings
		Biological wood protection

Factors that directly influence the service life of wood can be divided into two groups: exogenous factors represent environmental influences and are equivalent to the hazard of the environment for decay, whereas endogenous factors represent the ability of the material to withstand the environmental impacts. As long as exogenous and endogenous decay factors are balanced, service life goes on.

Suitability of the factor method approach. The drawback of the factor method is its multiplicative character, which leads to high error propagation. The factors considered in this method need to be determined very accurately, not taken from estimated quantities, otherwise uncertainties will be increased with every additional factor. Therefore, different authors have proposed modifying the factor method in different ways (e.g. Dickinson, 2005; Nicolella & De Pascale, 2005; Re Cecconi & Iacono, 2005; Englund, 2006). Regarding all of the advantages and disadvantages of the factor method, the following is uncontroversial.

Service life is a function of a reference service life, which depends on the particular performance requirements and different modifying factors, which have to be understood as mathematical variables, and can be expressed as:

$$ESL = f(A, B, C, D, E, F, G)$$

Assuming that service life of wood is determined by a number of dose-response relationships, the first step towards a service life prediction concept must be to identify the most important decay factors, which later have to be quantified in terms of their dose. The factor classification after ISO 15686 (2000) was therefore found to be just partly suitable, because some important decay factors (e.g. mesoclimate and microclimate) are inadequately considered, and the weighting of other factors (e.g. biotic influences) is disproportionately low.

The influences of macroclimate, mesoclimate and microclimate are subordinated to factor E (ISO 6241, 1984; ISO 15686-1, 2000), but in this manner their effect on service life cannot be gauged. Macroclimate, mesoclimate and microclimate have almost no direct influence on service life, as their effect as mechanical agents is low. However, their indirect effect on the growth of wood-destroying organisms is exceedingly high, but no allowance is made for this circumstance. The influence of biological agents is much too undifferentiated and unsuitable for the characterization of complex degradation mechanisms. Consideration of the three climate levels is made difficult by their strong reciprocal interactions, and some fundamental rules for the implementation of climatic influences will be derived here, with particular respect to wood used as a building material:

- A precise definition and quantification of the three climate levels (macroclimate, mesoclimate and microclimate) is hampered by their strong interactions.
- The macroclimate is described by the weather data of the site (e.g. precipitation, air temperature and wind speed).

- The mesoclimate is described by influences that are provoked by the environmental situation at the site (e.g. shading and windbreaks by trees and buildings).
- The microclimate is described by the situation at and within the construction (surface conditions).
- A prediction model should consider only a few factors, preferably with a direct influence on service life. Therefore, the microclimate as a result of macroclimate and mesoclimate may be useful for most building materials, e.g. concrete or steel.
- Concerning wooden building materials, surface degradation effects play a minor role, e.g. in terms of discoloration. However, the climate inside the material has a decisive influence on decay of wood. Therefore, the “material climate” determined by wood temperature, wood moisture content and their dynamics should be considered for service life prediction in the first instance.

Furthermore, the exposure of wood in ground contact is considered by factor E (chemical agents), although its direct influence on service life is low. In fact, the indirect influence on the direct factors nutrients, wood moisture content, wood temperature and constancy of conditions is very high. The decay rate in ground contact strongly depends on the soil type and its diversity of organisms (Edlund, 1998; Wakeling, 2006).

Multistage model. The authors recommend an open approach of a multistage model, which considers the direct decay factors, *i.e.* wood moisture content, wood temperature, nutrients, presence of species, inoculum potential and infection sites, in the first instance only. All other influences are indirect factors, and can therefore be expressed by a combination of direct decay factors, and will be considered in a second stage of the multistage model.

Data source priorities

The reliability of a prediction model depends strongly on the reliability of its database. Potential data sources that could be feasible for service life prediction

are listed in Table 7.1-6 with reference to their availability, reliability, closeness to reality and priority for consideration in a prediction model.

Table 7.1-6. Data sources evaluated referring to availability, reliability and closeness to reality of the data obtainable.

Data source	Availability	Reliability	Closeness to reality	Priority for consideration
In-service performance	low	moderate	high	high
Results from field tests	high	high	moderate	high
Results from laboratory tests	high	high	low	moderate
Survey analysis	moderate	low	moderate	moderate
Expert opinion	moderate	moderate	moderate	moderate

In-service performance investigations are closest to reality, with representative exposure conditions provided, but very few data are available from in service studies. In contrast, the readily available results from laboratory or field tests suffer from lower semblance to reality. Not least, this arises from the fact that many standard test methods with regard to durability or resistance were developed for testing of wood preservatives instead of natural durable or treated timber. The reliability of results from laboratory and field tests is adequately high (e.g. Van Acker *et al.*, 1999), although the sensitivity of evaluation methods depends on the accuracy of the operator and may suffer from subjectivity (Wilcox, 1983). Therefore, laboratory and field test methods are both irreplaceable and can be of high benefit for service life prediction. However, it is a great challenge to design test methods whose decay hazard levels correspond to real-life situations (e.g. Nilsson & Edlund, 1995), and more information and a better understanding of wood deterioration mechanisms are needed to improve short-term test methods applicable to service life prediction. In addition to pure test methods, which have high reliability, data can be obtained by surveys or by questioning experts. However, the number of experts for certain aspects can be limited, and data collected from surveys suffer from the subjectivity of the respondents and have to be interpreted carefully.

Further guidance on how to proceed with collected data for service life planning, to use their particular advantages, is given by ISO 15686-1 (2000). Results from short-term and long-term exposure have to be compared, and the crucial question is whether similar degradation patterns can be observed (Figure 7.1-1). Numerous conflicting resistance classifications depending on the test

type can be found in the literature, e.g. Leicester *et al.* (2005) reported that the use of CCA led to a markedly different decay rate in utility poles compared with that observed in small, clear specimens, owing to differences in the leaching action of the preservative for the two cases. Therefore, short-term tests have to be adapted in terms of exposure conditions and evaluation procedures, as long as similar degradation results from both tests. The same procedure is recommended for the adaptation of field test methods, whose results should be compared with in-service performance.

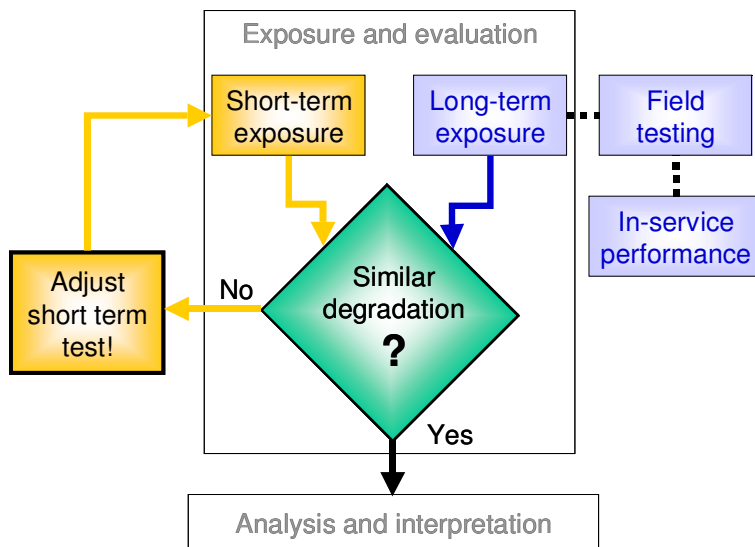


Figure 7.1-1. Systematic methodology for service life prediction of building components according to ISO 15686-2 (2001).

With regard to the current need not only for test methods that are suitable to provide reliable data for service life prediction of wood, but also for an initial database, it is indispensable to make use of results and experience obtained by methods in use so far. Therefore, existing data need to be interpreted carefully and, if necessary, errors have to be estimated after adopting the method according to the scheme (Figure 7.1-1). Only in this manner can future prediction models be substantiated. Nevertheless, the highest priority should be given to experience from in-service performance and to results from field tests, which are close to reality and/or focus on the influence of direct decay factors. To ensure reliable service life predictions, the database of the prediction model needs to be reliable. Therefore, it would be helpful to install a control in terms of an independent review board. To guarantee validity of the results, requirements

with respect to scientific correctness, e.g. reliability, reproducibility and accuracy, need to be verified. Data should not be considered until they have been passed by the review board.

7.1.5 Conclusions

This literature review on decay-influencing factors has shown that numerous factors could be considered for the prediction of service life of wood, but very different weightings can be found for different factors. However, it may be concluded that the effect of the various indirect decay factors is reducible to a few direct decay factors. Therefore, the approach of an open multistage model for service life is recommended, which is based on the influence of direct factors in the first stage, but extendable by the effects of further indirect factors at later stages. According to their different patterns of life, living conditions, occurrences and degradation mechanisms, wood-destroying organisms can be broadly divided into five groups: termites, beetles, fungi, bacteria and marine borers. Thereby, some requirements for one group exclude the others. Accordingly, a prediction model should initially consider only one of these groups. At a later stage the models for the different wood destroyers may be merged.

To compile a feasible database it is essential to make use of all available data sources that are maintainable from a scientific point of view, as well as data that should be obtained from future studies to close the existing gaps. Therefore, future research in the field of durability and service life estimations should focus more on the development of reality-orientated test methods, on comparative studies between laboratory, field and in-service performance, and on investigations of the interrelationships between direct factors and decay, not only on a laboratory scale.

Influences by indirect factors on direct factors have to be considered in a second stage of a model, but the need for research on these interrelationships is evident at this stage. Therefore, the development of climate indices remains desirable, but has to be improved by a consideration of the direct decay factors.

7.1.6 References

- Adachi, K., Inoue, M. & Kawai, S. (2004). Liquid impregnation into dry wood using a roller-pressing method. II. Effect of specimen size and processing variables on amount of water impregnation. *Mokuzai Gakkaishi*, 50, 243-247.
- Ammer, U. (1963). Untersuchungen über das Wachstum von Rotstreifepilzen in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 82, 360-391.
- Amos, G. A. & Dadswell, H. E. (1948). Siliceous inclusions in wood in relation to marine borer resistance. *Journal of the Council for Science and Industrial Research*, 21, 190-196.
- Augusta, U., Rapp, A. O. & Eckstein, D. (2004). Dauerhaftigkeit der wichtigsten heimischen Hölzer bei realitätsnaher Prüfung unter bautypischen Bedingungen. *Abschlussbericht zum Forschungsprojekt G-99/14 der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung*.
- Bauch, J. (1980). Variation der Holzstruktur aufgrund sekundärer Veränderungen. In *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft* (No. 131, pp. 96-97). Hamburg: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.
- Bavendamm, W. (1936). Erkennen, Nachweis und Kultur der Holzverfärbenden und holzersetzenden Pilze. In E. Abderhalben (Ed.), *Handbuch Biologische Arbeitsmethoden*, Abt. XII, Teil2/II (pp. 927-1134). Berlin: Urban & Schwarzenberg.
- Bavendamm, W. (1974). *Die Holzschäden und ihre Verhütung*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Beesley, J., Creffield, J. W. & Saunders, I. W. (1983). An Australian test for decay in painted timbers exposed to the weather. *Forest Products Journal*, 33, 57-63.
- Blanchette, R. A., Obst, J. R. & Timell, T. E. (1994). Biodegradation of compression wood and tension wood by white and brown rot fungi. *Holzforschung*, 48 (Suppl.), 34-42.
- Boutelje, J., Nilsson, T. & Rasmussen, S. (1986). *An analysis of the effects of some factors on the natural durability of pine (Pinus sylvestris L.) and*

- spruce (Picea abies Karst.)* (Document No. IRG/WP/1279). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Brischke, C., Welzbacher, C. R. & Rapp, A. O. (2006). Detection of fungal decay by high-energy multiple impact (HEMI) testing. *Holzforschung*, 60, 217-222.
- Browne, F. L. (1960). Wood siding left to weather naturally. *Southern Lumberman*, 201, 141-143.
- Bues, C.-T. & Triebel, J. (2000). Forstgeschichtliche Betrachtungen zur Bedeutung der mondphasenabhängigen Fällzeitregelung in Forstordnungen und anderem forstlichem Schrifttum. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 151, 432-438.
- Bürgel, J., Horvath, E., Haschka, J. & Messner, K. (1994). *Biological control with Trichoderma harzianum in relation to the formation for spores the production of soluble metabolites* (Document No. IRG/WP 94-10073). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Burmester, A. (1970). *Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit - Grundlagen und Vergütungsverfahren* (BAM Bericht Nr. 4). Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung.
- Butcher, J. A. (1984). *Premature decay of CCA-treated pine posts in horticultural soils - An overview* (Document No. IRG/WP/ 1241). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Carey, J. K. (2000). The COST Euro Index for fungal decay - A progress report. In *Proceedings of COST E22 Workshop*, Gozd Martuljek, Slovenia, 3-5 July 2000.
- Carey, J. K. (2002a). *L-joint trials. Part 1: Observations on the process of colonisation and decay* (Document No. IRG/WP02-20250). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Carey, J. K. (2002b). *L-joint trials. Part 2: The relationship between colonisation by decay fungi and long-term performance* (Document No. IRG/WP 02-20251). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Cartwright, K. S. G. (1941). The variability in resistance to decay on heartwood of home-grown western red cedar (*Thuja plicata* D. Don) and its relation to position in the log. *Forestry*, 15, 65-75.

-
- Clark, J. W. & Scheffer, T. C. (1983). Natural decay resistance of the heartwood of coast redwood *Sequoia sempervirens* (D. Don) Engl. *Forest Products Journal*, 33, 15-20.
- Clausen, C. A. (1997). *Enhanced removal of CCA from treated wood by Bacillus licheniformis in continuous culture* (Document No. IRG/WP 97-50083). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Clausnitzer, K.-D. (1990). *Historischer Holzschutz*. Stauffen, Freiburg: Öko-buchverlag.
- Council of the European Communities (1988). Council Directive of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the member states relating to construction products (89/106/EEC). Brussels: Council of the European Communities.
- Creemers, J., de Meijer, M., Zimmermann, T. & Sell, J. (2002). Influence of climatic factors on the weathering of coated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60, 411-420.
- Curling, S. F., Clausen, C. A. & Winandy, J. E. (2002). Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. *International biodeterioration and biodegradation*, 49, 13-19.
- De Groot, R. C. (1976). *Your wood can last for centuries*. New Orleans: United States, Department of Agriculture, Forest Service.
- De Groot, R. C. (1982). An assessment of climate index in predicting wood decay in houses. *Durability of Building Materials*, 1, 169-174.
- Derbyshire, H. & Carey, J. K. (2001). Evaluating joinery preservatives: Performance prediction using BS EN 330 L-joint trials (IP2/01). Watford: BRE.
- Dickinson, D. J. (2005). The factor method in wood preservation - A proposal for future progress from the COST E37 Task Force. In *Proceedings of COST E37 5th Meeting of Task Force "Performance Classification"*, Oslo, Norway, 18 June 2005.
- Doi, S. & Yamada, A. (1992). Preventing wood decay with *Trichoderma* spp. *Journal of the Hokkaido Forest Research Institute*, 6, 1-5.
- Edlund, M.-L. (1998). Durability of untreated wood exposed in terrestrial test fields and microcosms. *Material und Organismen*, 32, 235-275.

- Englund, F. (2006). *How to win friends and influence the market*Service life prediction and performance-based durability assessments of wood products in construction* (Document No. IRG/WP 06-20348). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Eriksson, K.-E. L., Blanchette, R. A. & Ander, P. (1990). *Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components*. Berlin: Springer.
- Erler, K. (2000). Chemische Korrosion von Holz und Holzkonstruktionen. Abschlussbericht zum Vorhaben "Vergleichende Betrachtung europäischer Bauprodukten-Normen mit nationalen Bestimmungen", Leipzig, Germany.
- European Committee for Standardization (1990). EN 252. Wood preservatives. Field test methods for determining the relative protective effectiveness in ground contact.
- European Committee for Standardization (1992). EN 335-1. Hazard classes of wood and wood-based products against biological attack. Classification of hazard classes.
- European Committee for Standardization (1992). EN 335-2. Hazard classes of wood and wood-based products against biological attack. Guide to the application of hazard classes to solid wood.
- European Committee for Standardization (1994). EN 350-1. Durability of wood and wood-based products. Part 1: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood.
- European Committee for Standardization (1994) EN 350-2. Durability of wood and wood-based products. Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe.
- European Committee for Standardization (1994). EN 460. Durability of wood and wood-based products. Natural durability of solid wood. Guide to the durability requirements for wood to be used in hazard classes.
- European Committee for Standardization (1997). EN 113. Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood-destroying basidiomycetes. Determination of toxic values.
- European Committee for Standardization (2005). EN 1001-2. Durability of wood and wood-based products. Terminology, Vocabulary.

-
- Feist, W. C. (1982). Weathering of wood in structural uses. In R. Meyers & R. Kellog (Eds.), *Structural uses of wood in adverse environment* (pp. 156-178). New York: Van Nostrand Reinhold.
- Fengel, D. & Wegener, G. (1989). *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions* (2nd ed.). Berlin: De Gruyter.
- Foliente, G. C., Leicester, R. H., Wang, C.-H., Mackenzie, C. & Cole, I. (2002). Durability design for wood construction. *Forest Products Journal*, 52, 10-19.
- Gardener, J. A. F. & Barton, G. M. (1958). The extraneous component of western red cedar. *Forest Products Journal*, 8, 189-192.
- Gardener, J. A. F. & Barton, G. M. (1960). The distribution of dehydroquercitin in Douglas fir and western larch. *Forest Products Journal*, 10, 171-173.
- Greaves, H. (1977). An illustrated comment on the soft rot problem in Australia and Papua New Guinea. *Holzforschung*, 31, 71-79.
- Grinda, M. & Carey, J. (2004). The COST Euro Index for fungal decay - Five years results. In *Proceedings of COST E22 Final Workshop*, Estoril, Portugal, 22-23 March 2004.
- Grosser, D. (1985). *Pflanzliche und tierische Bau- und Werkholzschildlinge*. Stuttgart: DRW.
- Guilley, E., Charpentier, J. P., Ayadi, N., Snackers, G., Nepveu, G. & Charrier, B. (2004). Decay resistance against *Coriolus versicolor* in sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.): Analysis of the between-tree variability and correlations with extractives, tree growth and other basic wood properties. *Wood Science and Technology*, 38, 539-554.
- Haupt, M., Leithoff, H., Meier, D., Puls, J., Richter, H. G. & Faix, O. (2003). Heartwood extractives and natural durability of plantation-grown teakwood (*Tectona grandis* L.) - A case study. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 473-474.
- Henningsson, B. (1967). *The physiology, inter-relationship and effects on the wood of fungi which attack birch and aspen pulpwood* (Research Note 19). Uppsala: Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences.

- Highley, T. L. & Ricard, J. (1988). Antagonism of *Trichoderma* spp. and *Glilocladium virens* against wood decay fungi. *Holzforschung*, 38, 73-78.
- Hillis, W. E. (1987) *Heartwood and tree exudates*. New York: Springer.
- Hösli, J. P. & Osusky, A. (1978). Das Verhalten der verthyllten Randzone von rotkernigem Buchenholz beim Abbau durch *Coniophora puteana* (Schum.) Fr. und *Trametes versicolor* (L. ex Fr.) Pilat. *Material und Organismen*, 13, 51-58.
- International Standardization Organization (1984). ISO 6241. Performance standards in buildings - Principles for their preparation and factors to be considered.
- International Standardization Organization (2000). ISO 15686-1. Building and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles.
- International Standardization Organization (2001). ISO 15686-2. Building and constructed assets - Service life planning - Part 2: Service life prediction procedures.
- Jellison, J. & Jasalavich, C. (2000). A review of selected methods for the detection of degradative fungi. *International biodeterioration and biodegradation*, 46, 241-244.
- Kamdem, D. P., Pizzi, A. & Jermannaud, A. (2002). Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60, 1-6.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe* (2nd ed.). Berlin: Springer.
- Kropf, F. W., Sell, J., Feist & W. C. (1993). Vergleichender Bewitterungsversuch mit nordamerikanischen und europäischen Holzanstrichen. *Forschungs- und Arbeitsberichte EMPA-Abt. Holz* Nr. 115/27.
- Kropf, F. W., Sell, J. & Feist, W. C. (1994). Comparative weathering tests of North American and European exterior wood finishes. *Forest Products Journal*, 44, 33-41.
- Leicester, R. H., Wang, C.-H., Nguyen, M. N., Thornton, J. D., Johnson, G., Gardner, D. *et al.* (2003a). *An engineering model for the decay of timber in ground contact* (Document No. IRG/ WP 03-20260). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.

-
- Leicester, R. H., Wang, C.-H. & Cookson, L. J. (2003b). *A risk model for termite attack in Australia* (Document No. IRG/WP 03-10468). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Leicester, R. H., Wang, C.-H., Nguyen, M. N. & Foliente, G. C. (2005). Engineering models for biological attack on timber structures. In *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, TT4-217, Lyon, France.
- Leithoff, H., Richter, H. & Sulaiman, O. (2001). Vergleich der natu" rlichen Dauerhaftigkeit von Teakholz aus mittelamerikanischen Plantagen und von Naturstandorten. In *Jahresbericht der Bundesforschungsanstalt f" ur Forst- und Holzwirtschaft*, 52-53. <http://www.bfafh.de/bibl/pdf/jb2001.pdf>
- Liese, W. & Peek, R.-D. (1987). Erfahrungen bei der Lagerung und Vermarktung von Holz im Katastrophenfall. *Allgemeine Forstzeitschrift*, 42, 909-912.
- Metzeler, B., Gross, M. & Mahler, G. (1993). Pilzentwicklung in Fichtenholz unter Schutzatmosph" are. *European Journal of Forest Pathology*, 23, 281-289.
- Mönck, W. (1987). *Schäden an Holzkonstruktionen*. Berlin: Bauwesen.
- Morris, P. I., Dickinson, D. J. & Calver, B. (1992). *Biological control of internal decay in Scots pine poles: A seven year experiment* (Document No. IRG/WP/1529-92). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Nicolella, M. & De Pascale, A. (2005). Service life of building components. Analysis and proposals of definition of the modifying factors. In *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, TT4-180, Lyon, France.
- Nilsson, T. & Daniel, G. (1992). *On the use of % weight loss as a measure for expressing results of laboratory decay experiments* (Document No. IRG/WP 2394-92). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Nilsson, T. & Edlund, M.-L. (1995). *Laboratory versus field tests for evaluating wood preservatives: A scientific view* (Document No. IRG/WP 95-20076). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.

- Nilsson, T., Singh, A. P. & Daniel, G. (1992). Ultrastructure of the attack of *Eusideroxylon zwageri* wood by tunnelling bacteria. *Holzforschung*, 46, 361-367.
- Norén, J. (2001). *Assessment and mapping of environmental degradation factors in outdoor applications*. Dissertation, KTH, Stockholm.
- von Pechmann, H., Graessle, E. & Wutz, A. (1964). Untersuchungen über Bläuepilze an Kiefernholz. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 83, 290-314.
- Piirto, D. D. & Wilcox, W. W. (1981). *Comparative properties of old and young-growth giant sequoia of potential significance to wood utilization*. Bull. 1901. Division of Agricultural Sciences, University of California.
- Råberg, U., Edlund, M.-L., Terziev, N. & Land, C. J. (2005). Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in Europe - An overview. *Journal of Wood Science*, 51, 429-440.
- Raczkowski, J. & Fabisiak, E. (1987). Effect of gamma radiation on shear strength of pine wood. *Holzforschung und Holzverwertung*, 39, 145-148.
- Rapp, A. O. (Ed.) (2001). Review on heat treatments of wood. *Proceedings of the Special Seminar on Heat Treatments*, Antibes, France, 9 February 2001. EUR 19885. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Rapp, A. O. & Brischke, C. (2004). The influence of macro and micro climate on decay. In *Proceedings of COST E22 Final Workshop*, Estoril, Portugal, 22-23 March 2004.
- Rapp, A. O., Peek, R.-D. & Sailer, M. (2000). Modelling the moisture induced risk of decay for treated and untreated wood above ground. *Holzforschung*, 54, 111-118.
- Rapp, A. O., Viitanen, H. & Nilsson, T. (2002). *Natural durability of 4 different Larix species tested in soil contact* (Document No. IRG/WP 02-10434). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Re Cecconi, F. & Iacono, P. (2005). Enhancing the factor method - Suggestions to avoid subjectivity. In *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, TT4-172, Lyon, France.

-
- Richter, H. G. (Ed.) (2000). *Technology for high quality products from black locust (Robinia pseudoacacia)*. Final Report. Inco Copernicus Project No. 96-4114, EU Contract Nr. ERB IC15-CT960713, Hamburg.
- Roux, M.-L., Wozniak, E., Miller, E. R., Boxall, J., Böttcher, P., Kropf, F., *et al.* (1988). Natural weathering of various surface coatings on five species at four European sites. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 46, 165-170.
- Rydell, Å., Bergström, M. & Elowson, T. (2005). Mass loss and moisture dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) exposed outdoors above ground in Sweden. *Holzforschung*, 59, 183-189.
- Rypáček, V. (1966). *Biologie holzerstörender Pilze*. Jena: Gustav Fischer.
- Sailer, M., Rapp, A. O., Leithoff, H. & Peek, R.-D. (2000). Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitzebehandlung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58, 15-22.
- Scheffer, T. C. (1957). Decay resistance of western red cedar. *Journal of Forestry*, 55, 434-442.
- Scheffer, T. C. (1971). A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. *Forest Products Journal*, 21, 25-31.
- Scheffer, T. C. (1986). O₂ requirements for growth and survival of wood-decaying and sapwood-staining fungi. *Canadian Journal of Botany*, 64, 1957-1963.
- Scheffer, T. C. & Hopp, H. (1949). *Decay resistance of black locust heartwood* (Techn. Bull. No. 984). Washington DC: US Department of Agriculture.
- Schmidt, H. (2005). Vorbeugender baulicher Holzschutz - Außenbereich. In J. Müller (Ed.), *Holzschutz im Hochbau* (pp. 169-187). Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- Schmidt, O. (2000). Molecular methods for the characterisation and identification of the dry rot fungus *Serpula lacrymans*. *Holzforschung*, 53, 221-228.
- Schmidt, O. (2006). *Wood and tree fungi. Biology, damage, protection, and use*. Berlin: Springer.
- Schmidt, O. & Moreth, U. (2000). Species-specific PCR primers in the rDNA-ITS region as a diagnostic tool for *Serpula lacrymans*. *Mycological Research*, 104, 69-72.

- Schoeman, M. W., Webber, J. F. & Dickinson, D. J. (1994). Chain-saw application of *Trichoderma harzianum* Rifai to reduce fungal deterioration of freshly felled pine logs. *Material und Organismen*, 28, 243-350.
- Schuhmacher, P. & Schulz, H. (1992). Untersuchungen über das zunehmende Auftreten von Innenbläue an Kiefern-Schnittholz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 50, 125-134.
- Schwantes, H. O. (1996). *Biologie der Pilze: Eine Einführung in die angewandte Mykologie*. Stuttgart: Ulmer.
- Schwarze, F. W. M. R. & Spycher, M. (2005). Resistance of thermo-hygro-mechanically densified wood to colonisation and degradation by brown-rot fungi. *Holzforschung*, 59, 358-363.
- Sell, J. (1980). Oberflächenbehandlung von Brettschichtholzträgern: Anforderungen, praktische Erfahrungen und Versuchsergebnisse. *Holz-Zentralblatt*, 106, 629-630.
- Simatupang, M. H. (1964). *Chemische Untersuchungen an Teak- Holz (Tectona grandis L. F.)*. Dissertation, Universität Hamburg.
- Singh, A. P., Nilsson, T. & Daniel, G. F. (1987). Ultrastructure of the attack of wood of two high lignin tropical hardwood species, *Alstonia scholaris* and *Homalium foetidum*, by tunnelling bacteria. *Journal of the Institute of Wood Science*, 11, 26-42.
- Stirling, R. & Morris, P. I. (2006). *The influence of extractives on western red cedar's equilibrium moisture content* (Document No. IRG/WP 06-40331). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Teischinger, A. & Fellner J. (2000). Alte Regeln neu interpretiert – Praxisversuche mit termingeschlägertem Holz. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 151, 425-431.
- Terziev, N. & Nilsson, T. (1999). Effect of soluble nutrient content in wood on its susceptibility to soft rot and bacterial attack in ground test. *Holzforschung*, 53, 575-579.
- Timell, T. E. (1986). *Compression wood in gymnosperms*. Vols. 1-3. Heidelberg: Springer.

-
- Tjeerdsma, B. F., Boontsra, 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, 149-153.
- Van Acker, J. (2003). Service life prediction and creation of a Euro decay index - Exterior applications out of ground contact. In *Proceedings of COST E22 Workshop*, Zagreb, Croatia, 22-23 September 2003.
- Van Acker, J., Militz, H. & Stevens, M. (1999). The significance of accelerated laboratory testing methods determining the natural durability of wood. *Holzforschung*, 53, 449-458.
- Van Acker, J., Stevens, M., Carey, J., Sierra-Alvarez, R., Militz, H., Le Bayon, I., *et al.* (2003). Biological durability of wood in relation to end-use. Part 1. Towards a European standard for laboratory testing of the biological durability of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61, 35-45.
- Viitanen, H. (1996). *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden constructions*. Dissertation, Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Viitanen, H. & Ritschkoff, A.-C. (1991). *Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture*. Uppsala: Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Viitanen, H., Paajanen, L., Saranpää, P. & Viitaniemi, P. (1997). *Durability of larch (Larix spp.) wood against brown-rot fungi* (Document No. IRG/WP 97-10228). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Wagenführ, R. & Schreiber, C. (1985). *Holzatlas* (2nd ed.). Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
- Wakeling, R. N. (2006). *Is field test data from 20 x 20 mm stakes reliable? Effects of decay hazard, decay type and preservative depletion hazard* (Document No. IRG/WP 06-20327). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Wälchli, O. (1977). Der Temperatureinfluß auf die Holzerstörung durch Pilze. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 35, 45-51.

- Wälchli, O. (1980). Der echte Hausschwamm - Erfahrungen über Ursachen und Wirkungen seines Auftretens. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 38, 169-174.
- Ważny, J. & Krajewski, K. J. (1984). Jahreszeitliche Änderungen der Dauerhaftigkeit von Kiefernholz gegenüber holzerstörenden Pilzen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 42, 55-58.
- Weindling, R. (1934). Studies on a lethal principle effective in the parasitic action of *Trichoderma lignorum* on *Rhizoctonia solani* and other soil fungi. *Phytopathology*, 24, 1153-1179.
- Welzbacher, C. R. (2001). *Vergleichende Prüfung von umweltfreundlichen, biozidfreien Verfahren zur Vergütung von Holz durch Hitze*. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde, Germany.
- Welzbacher, C. R., Heger, F., Girardet, F., Navi, P. & Rapp, A. O (2004). Decay resistance of thermo-hydro-mechanically densified wood. In *Proceedings of COST E22 Final workshop*, Estoril, Portugal, 22-23 March 2004.
- Welzbacher, C. R. & Rapp, A. O. (2003). *Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes - Durability* (Document No. IRG/WP 02-40229). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Westin, M., Rapp, A. O. & Nilsson, T. (2004). *Durability of pine modified by 9 different methods* (Document No. IRG/WP 02- 10434). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Wilcox, W. W. (1977). Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. *Wood and Fiber Science*, 9, 252-257.
- Wilcox, W. W. (1983). Sensitivity of the "pick test" for field detection of early wood decay. *Forest Products Journal*, 33, 29-30.
- Wilcox, W. W. & Dietz, M. (1997). Fungi causing above-ground wood decay in structures in California. *Wood and Fibre Science*, 29, 291-298.
- Willeitner, H. (1982). Natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes. In *Vorträge der 16. Holzschutztagung der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung* (pp. 1-17). München: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung.
- Willeitner, H. (1984). Pilzresistenz von Buchsbaum und zwei Buchs-Austauschhölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 42, 275.

- Winandy, J. E. (2001). Thermal degradation of fire-retardant treated wood: Predicting residual service life. *Forest Products Journal*, 51, 47-54.
- Wong, A. H. H. & Singh, A. P. (1997). *Microbial decay in an extremely durable Malaysian hardwood Belian (Eusideroxylon zwageri) - An overview* (Document No. IRG/WP 97-10216). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Yu, Q. B., Yang, D. Q., Zhang, S. Y., Beaulieu, J. & Duchesne, I. (2003). Genetic variation in decay resistance and its correlation to wood density and growth in white spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 2177-2183.
- Zabel, R. A. & Morrell, J. J. (1992). *Wood microbiology, decay and its prevention*. Orlando, FL: Academic Press.
- Zürcher, E. (2000). Mondbezogene Traditionen in der Forstwirtschaft und Phänomene in der Baumbiologie. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 151, 417-424.


7.2 Publikation II: Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes.


Building and Environment. 2007, doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.002

ARTICLE IN PRESS


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com


ScienceDirect


BUILDING AND ENVIRONMENT

Building and Environment ■■■■■ ■■■ ■■■ ■■■ ■■■

www.elsevier.com/locate/buildenv

Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes

Christian Brischke^{a,*}, Andreas Otto Rapp^a, Rolf Bayerbach^b

^a*Institute of Vocational Sciences in the Building Trade (IBW), Leibniz University Hannover, Herrenhäuser Straße 8, 30419 Hannover, Germany*
^b*PYTEC GmbH, Durchdiech 10, 21037 Hamburg, Germany*

Received 6 June 2007; received in revised form 25 September 2007; accepted 1 October 2007

Abstract

Moisture as an important influence factor on fungal growth needs to be considered for service life prediction of wood and wood-based products. Therefore, a long-term moisture measuring and data logging method for wood in weathered conditions was developed. The method is based on measuring the electrical resistance with glued electrodes for sustainable connection. The measuring point at the tip of the electrodes was glued conductively into the wood, the remaining outer part of the electrodes was glued with an isolating glue. For this purpose, special conductive and isolating glues and electrodes were developed and comparatively evaluated in laboratory tests. The most suitable system consisted of a 2k-epoxy resin, serving for the isolating glue and also as conductive glue (when mixed with graphite powder and ethanol) in combination with a partly isolated stainless steel cable, acting as both, electrode and cable. This system was further tested in combination with mobile mini data logger at 29 different exposure sites in Europe and the United States. After 4–6 years of natural weathering with many extreme climatic and moisture changes, no loosening or other detectable abnormality in 541 pairs of electrodes was observed. The data logging systems were working without any problems for 5 years with the first and only battery, and without any additional maintenance. For the calibration of the measuring system, resistance characteristics were determined for different provenances of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Norway spruce (*Picea abies* Karst.), and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco).

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Decay factor; In-service performance; Long-term adhesion; Moisture content; Polarisation; Service life prediction

1. Introduction

Service life prediction of wood is required by more and more building codes worldwide [1] and thus methods for the quantification of decay influencing factors are sought. The wood moisture content (MC), the wood temperature, and their dynamics can be expressed as the “material climate” of wood [1], which directly determines the service life of wooden components. Moisture has an essential influence on fungal growth and is for this reason an important factor for the prediction of service life of wooden constructions [1,2]. Against this background, it is advisable to measure and record the electrical resistance in the inner part of wood exposed to weather over a long period of time to determine moisture [3,4]. The MC can be measured by metal electrodes which are incited in the wood. A problem is the inability of metal to produce a sustainable mechanical adhesion to the wood cells. Consequently, the electrodes do not maintain electrical contact due to the swelling and shrinking of wood [5,6]. Especially in long-term measurements, two types of errors are conceivable [7]:

1. A lower resistance is measured because of the entry of water in the capillary interstices along the electrode.
2. A higher resistance is measured because of the decreasing contact pressure between electrode and wood resulting in its loosening.

The capillary water uptake can be avoided by gluing the upper part of the electrode in the wood [8]. However, this does not prevent the most important measuring point at the tip of the electrode from declining contact. As a consequence, a sustainable and isolating connection

*Corresponding author. Tel.: +49 511 762 5829; fax: +49 511 762 3196.
E-mail address: brischke@ibw.uni-hannover.de (C. Brischke).

0360-1323/\$ - see front matter © 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.002

Please cite this article as: Brischke C, et al. Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment* (2007), doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.002

By Christian Brischke^{a,*}, Andreas Otto Rapp^a, and Rolf Bayerbach^b

Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH),
Hamburg, Germany

^aInstitute for Wood Biology and Wood Protection

^bInstitute for Wood Chemistry and Chemical Technology of Wood

*corresponding author

Leuschnerstr. 91

21031 Hamburg

Tel.: +49-(0)40-73962-419

fax: +49-(0)40-73962-499

E-mail address: c.brischke@holz.uni-hamburg.de

Abstract

Moisture as an important influence factor on fungal growth needs to be considered for service life prediction of wood and wood-based products. Therefore a long-term moisture measuring and data logging method for wood in weathered conditions was developed. The method is based on measuring the electrical resistance with glued electrodes for sustainable connection. The measuring point at the tip of the electrodes was glued conductively into the wood, the remaining outer part of the electrodes was glued with an isolating glue. For this purpose special conductive and isolating glues and electrodes were developed and comparatively evaluated in laboratory tests. As most suitable proved a system consisting of a 2k-epoxy resin, serving for the isolating glue and also as conductive glue (when mixed with graphite powder and ethanol) in combination with a partly isolated stainless steel cable, acting as both, electrode and cable. This system was further tested in combination with mobile mini data logger at 29 different exposure sites in Europe and the United States. After 4-6 years of natural weathering with many extreme climatic and moisture changes no loosening or other detectable abnormality in 541 pairs of electrodes was observed. The data logging systems were working without any problems for 5 years with the first and only battery, and without any additional

maintenance. For the calibration of the measuring system resistance characteristics were determined for different provenances of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Norway spruce (*Picea abies* Karst.), and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco).

Keywords: Decay factor, in-service performance, long term adhesion, moisture content, polarization, service life prediction.

7.2.1 Introduction

Service life prediction of wood is required by more and more building codes worldwide [1] and thus methods for the quantification of decay influencing factors are sought. The wood moisture content, the wood temperature, and their dynamics can be expressed as the "material climate" of wood [1], which directly determines the service life of wooden components. Moisture has an essential influence on fungal growth and is for this reason an important factor for the prediction of service life of wooden constructions [1, 2]. Against this background it is advisable to measure and record the electrical resistance in the inner part of wood exposed to weather over a long period of time to determine moisture [3, 4]. The moisture content can be measured by metal electrodes which are incited in the wood. A problem is the inability of metal to produce a sustainable mechanical adhesion to the wood cells. Consequently the electrodes do not maintain electrical contact due to the swelling and shrinking of wood [5, 6]. Especially in long term measurements two types of errors are conceivable [7]:

1. A lower resistance is measured because of the entry of water in the capillary interstices along the electrode.
2. A higher resistance is measured because of the decreasing contact pressure between electrode and wood resulting in its loosening.

The capillary water uptake can be avoided by gluing the upper part of the electrode in the wood [8]. However, this does not prevent the most important measuring point at the tip of the electrode from declining contact. As a consequence a sustainable and isolating connection of the upper part and a

sustainable and conductive connection of the measuring point to the wood is needed.

The tool to be developed should provide the detection of critical moisture conditions, which allow fungal growth and thus the onset of decay. This paper on long-term moisture monitoring, describes a method based on internal conductively glued electrodes in combination with a data recording system to be applied for field studies as well as for in-situ measurements to monitor objects in service.

7.2.2 Materials and methods

Specimens

The test specimens were made exemplarily from the following wood species: non-durable and permeable Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.), non-durable and refractory Norway spruce (*Picea abies* Karst.), and moderately durable and refractory Douglas fir heartwood (*Pseudotsuga menziesii* Franco). The wood species were chosen with respect to their different decay and moisture susceptibility as well as their use in different studies on decay influencing factors (e.g. [9, 10]). In addition, pine sapwood is the commonly used reference material in various European standards (e.g. EN 252 [11]). For calibration experiments wood from three different provenances of each wood species was used (Table 7.2-1).

Table 7.2-1. Origin of timber used for specimens in calibration experiments.

Wood species	Provenance 1	Provenance 2	Provenance 3
Norway spruce	North Rhine-Westphalia, Germany	Lower Saxony, Germany	Scandinavia
Scots pine sapwood	Mecklenburg-Western Pomerania, Germany	Scandinavia	Rhineland-Palatinate, Germany
Douglas fir heartwood	Rhineland-Palatinate, Germany	Baden-Wuerttemberg, Germany	Oregon, U.S.

For the field tests and the polarization tests specimens of 500x50x25 mm³ were used, for the calibration of the measurement system specimens were

75x50x25 mm³ in dimension. A slight deviation of the grain angle up to 10° was allowed to simulate practice conditions.

Glue formulations

To formulate a suitable conductive glue, experiments with the following agents were made:

1. 1k-polyurethan solvent based lacquer (product name: Zweihorn SDF 9) and acetone
2. 2k-epoxy resin (Epoxydharz L, Conrad Deutschland, Artikel-Nr.: 236349-62 and Härter L, Conrad Deutschland, Artikel-Nr.: 236357-62) and ethanol

As conductive agents were used:

1. copper powder (granulation < 63 µm)
2. graphite powder (granulation < 40 µm)

The glue/electrode combinations were tested regarding the optimal combination for later field applications. The isolating glue was formulated from the 2k-epoxy resin with wheat flour (type 405) as filler. For microscopic and macroscopic examinations, the isolating glue was stained with Sudan IV, which assured the exclusive coloration of the glue.

Examination of glue properties

The viscosity of the glues was evaluated by extruding the mixture with a 1 mm injection needle, the homogeneity of the glues by their visual appearance. For the examination of conductivity bands of glue with a length of 100 mm and a diameter of 5 mm were dried for 24 hours in a climate chamber at 20°C/65%RH. The electrical resistance of the band was measured with a moisture meter type GANN Hydromette RTU 600.

The different mixtures were dried for two days at 20°C/65%RH and then evaluated with respect to their physical condition into the categories soft, gummy hard and hard. Abnormalities like cracking and splintering were documented.

Electrodes

The electrodes were made of either polyamide coated stainless steel cables with a core diameter of 1.2 mm or a commercial PVC coated copper cable with a diameter of 1.5 mm. The copper electrodes were used in combination with copper containing glue mixtures, the stainless steel electrodes were used in combination with the graphite containing electrodes.

The electrodes were glued in predrilled holes of 4 mm diameter in different depths depending on the position, where the moisture content should be measured. The distance between the centers of the holes was 30 mm parallel and 6 mm orthogonal to the grain (Figure 7.2-1) in order to minimize the risk of crack formation. 0.1 ml of the conductive glue was injected to the bottom of the holes without contaminating its walls. At the tip of the electrode the first 5 mm of the plastic coating of the electrodes were removed and the electrode was put into the glue. After 24 h hardening, the isolating glue was filled into the holes (Figure 7.2-2) and the electrodes were attached to the data logger.

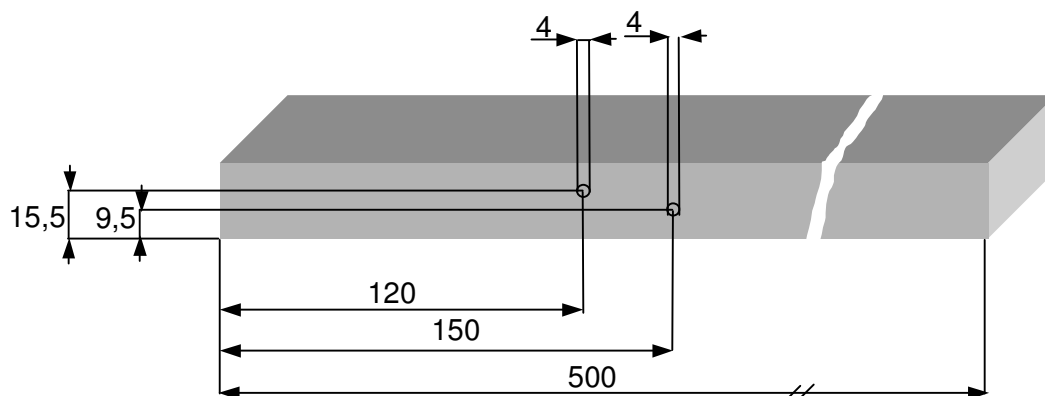


Figure 7.2-1. Specimen according to EN 252 [11] and position of holes for installation of electrodes (all dimensions in mm).

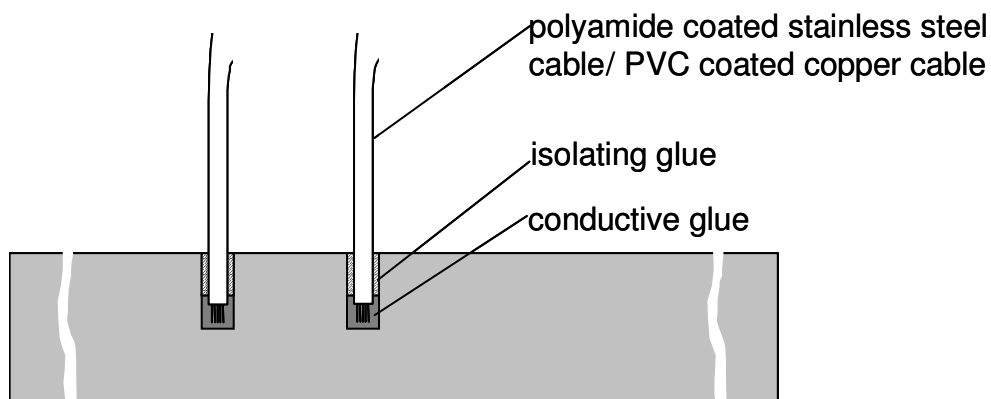


Figure 7.2-2. Schematic cross cut through a specimen and installed electrodes.

Data logger

The data logger (product name: Materialfox Mini) were developed by Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Germany, in co-operation with the Federal Research Center for Forestry and Forest Products (BFH). The memory capacity was 16 000. The data logger were equipped with three ports. The measuring ranged from $2 \cdot 10^4 \Omega$ to $5 \cdot 10^8 \Omega$. A sampling interval of 24 h was chosen for the field installation.

The measuring principle was based on the discharge – time – measurement method. First a capacitor was charged through a very small ohmic resistance and then discharged through the material to be measured. Based on the time needed for discharging, the resistance of the material can be calculated.

For the field work lithium/thionylchloride batteries (type SL-770, Sonnenschein Lithium GmbH, Buedingen, Germany) were chosen, which could be used in a temperature range between -55 to $+85^\circ\text{C}$. The battery voltage was 3.6 V, the nominal capacity 7.2 Ah. Stored in the shelf at 20°C they loose less than 1% of their capacity per year. Connected to three logger the batteries should last five years in the field.

Polarisation test

A polarisation test was performed with electrodes installed in Scots pine sapwood and Douglas fir heartwood specimens at a moisture content of 12%. 16 measurements of resistance were performed with the data logger Materialfox

Mini in 16 min. Afterwards the electrical poles were changed and the resistance was measured again.

Calibration of the measurement system

To determine the relationship between the electrical resistance and the wood moisture content (MC) gravimetric and electric MC measurements were carried out in comparison at three target MCs (MC = 15, 25 and 50%) and three target temperatures (T = 4, 20, and 36°C). The target yields were selected with respect to their relevance in practice, where MCs below 15% can not be expected in weathered outdoor exposure and temperatures below the freezing point as well as MCs above 50% lead to inaccurate and implausible resistance values [4, 12]. Specimens were prepared from Norway spruce, Scots pine sapwood, and Douglas fir heartwood, each from three different origins (Table 7.2-1). For each MC/wood species combination eight replicates were used.

The conditioning regime for moistening of the specimens to the target MC is described in Table 7.2-2. The specimens were tightly packed in polyethylene bags as soon as the target MC was achieved. The steel cables were lead through the bag to allow connection to the data logger. The moisture measurements were conducted successively at the three temperatures with two Materialfox Mini data logger, the mean values of both logger were used for plotting the electrical resistance against the gravimetrically measured MC.

Table 7.2-2. Conditioning procedure for calibration specimens.

Target moisture content	Conditioning procedure
15%	Storing above a saturated solution of sodium chloride at 20°C for 9 weeks
25%	Storing above a saturated solution of potassium sulfate at 20°C for 9 weeks
50%	Water pressure impregnation, storing in polyethylene (PE) foil for six days at 4°C, afterwards drying down to 50% moisture content at room temperature, subsequent storage in PE foil for another six days at 4°C

Exposure sites

After screening, the optimal combination of electrodes and glues was tested in the field. In total 541 pairs of conductively glued electrodes in ten European

wood species were located at 29 different sites in Europe and in the United States for natural weathering and moisture recording.

7.2.3 Results and discussion – laboratory tests

Screening of the glues

Glue mixtures containing copper showed:

1. The copper sedimented in the mixture
2. After hardening and weathering a green discoloration in the wood was observed, indicating the formation of copper acetate ions in the wood. Consequently copper should not be used as a conductive medium in the glue.

Glue mixtures containing graphite powder showed:

1. Different quality in applicability depending on the proportion graphite powder : resin.
2. Different quality in hardness, splintering and cracking after drying.
3. Different electrical resistance.
4. Glues containing 2k-epoxy resin with a proportion of 1.4 for graphite powder : resin performed best after drying (Table 7.2-5).

Details show Table 7.2-3 and Table 7.2-4.

Table 7.2-3. Formulations and screening results of copper containing glues.

1k-PUR-solvent based lacquer: Zweihorn SDF-9	Acetone	Graphite powder, granulation < 50 µm	Copper powder, granulation < 63 µm	Viscosity, suitability for extrusion	Electrical resistance ^{a)}	Evaluation of the elasticity ^{a)}	Electrical resistance ^{b)}	Evaluation of the elasticity ^{b)}
[g]	[g]	[g]	[g]		[kΩ]		[kΩ]	
50	-	-	50	applicable ^{c)}	1	hard	1	hard ^{d)}
30	15	-	55	applicable ^{c)}	1	hard	1	hard
70	-	30	-	applicable	1	soft	1	hard
33	33	33	-	applicable	1	hard	1	hard

^{a)} after 24 h drying in climate chamber at 20°C/65%RH

^{b)} after 1h at 105°C and 24 h climatisation in climate chamber at 20°C/65%RH

^{c)} copper sediments

^{d)} green discolouration

Table 7.2-4. Formulations and screening results of graphite containing glues.

2k-epoxy resin: Conrad Epoxydharz L	Ethanol	Graphite powder granulation < 50 µm	Ratio graphite : resin	Viscosity, suitability for extrusion	Electrical resistance ^{a)}	Evaluation of the elasticity ^{a)}	Electrical resistance ^{b)}	Evaluation of the elasticity ^{b)}
[g]	[g]	[g]			[kΩ]		[kΩ]	
50	-	50	1.00	not applicable	-		-	
60	-	60	1.00	not applicable	24	hard	24	hard
65	-	35	0.54	not applicable	320	hard	320	hard
70	-	30	0.43	applicable	5000	hard	5000	hard
35	30	35	1.00	applicable	27	hard	18	hard
40	30	30	0.75	applicable	90	hard	600	hard
25	35	40	1.60	not applicable ^{c)}	1	hard	1	hard
25	40	35	1.40	applicable	1	hard	1	hard
30	40	30	1.00	applicable	18	hard	38	hard
18	50	32	1.78	applicable	1	hard	1	hard ^{d)}
18	57	25	1.39	applicable	1	hard	1	hard ^{d)}
9	78	13	1.45	applicable	1.5	hard	1.5	hard

^{a)} after 24 h drying in climate chamber at 20 °C/65%RH

^{b)} after 1h at 105 °C and 24 h climatisation in climate chamber at 20 °C/65%RH

^{c)} no adhesion to the electrodes

^{d)} little cracking in the dried glue

Polarisation test

In the preliminary polarisation tests no polarisation or electrostatic charging occurred. Furthermore a potentially occurring increase in electrical resistance with the measurement duration as described by Welsh [13], seemed to be negligible, because amperages and measuring times applied in this study were too small to have a significant effect.

Properties of the most suitable system after screening

The screening tests revealed the following system, specified in Table 7.2-5, as most suitable: A 2k-epoxy resin serving for the isolating glue and conductive glue (when mixed with graphite powder) in combination with an isolated stainless steel cable, acting as both electrode and cable (Figure 7.2-2 and Figure 7.2-3).

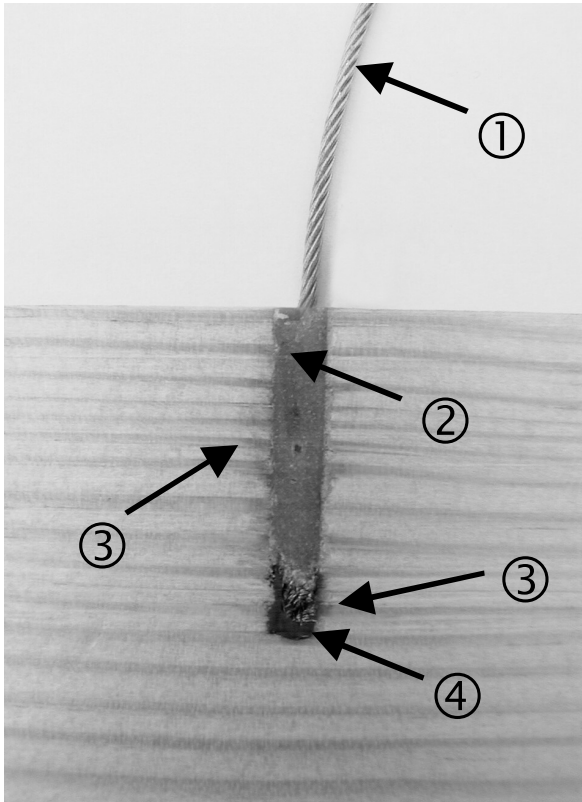


Figure 7.2-3. Cross cut through a glued electrode. The polyamide coated stainless steel cable ① is glued in predrilled holes. On the bottom of the hole the uncoated cable is glued with the conductive glue ④, the upper part of the coated cable is glued with the isolating glue ②. The glue has penetrated into the lumina of the tracheids and produces a very durable connection ③.

The screening showed that the ratio between 2k-epoxy binder and graphite powder was crucial for conductivity and elasticity of the glue, whereby ethanol had only a minor effect. The glues described in Table 7.2-5 revealed a strong adhesion to the wood by penetrating about one to two tracheids as visible in Figure 7.2-3, where stained glue was applied.

Table 7.2-5. Formulation of the conductive and the isolating glue.

Glue type	Ingredient	Ratio of ingredients
Conductive glue	Epoxy resin: Epoxidharz L, Conrad Germany, Artikel-Nr.: 236349 - 62	19.2 g / 100 g
	Hardener: Härter L, Conrad Germany, Artikel-Nr.: 236357 - 62	5.8 g / 100 g
	Ethanol	40.0 g / 100 g
	Graphite powder (granulation <50 µm)	35.0 g / 100 g
Isolating glue	Epoxy resin: Epoxidharz L, Conrad Germany, Artikel-Nr.: 236349 - 62	58.8 g / 100 g
	Hardener: Härter L, Conrad Germany, Artikel-Nr.: 236357 - 62	17.7 g / 100 g
	Wheat flour type 405	23.5 g / 100 g

Resistance characteristic curves

Norway spruce, Scots pine sapwood and Douglas fir heartwood revealed differences in electrical resistance at same moisture content (Figure 7.2-4 to Figure 7.2-6) between the different wood species as well as between different temperatures. The dependency of the electrical resistance on the wood species and on temperature was described by many authors [4, 6, 14, 15] and points out the need for wood-species specific characteristic curves.

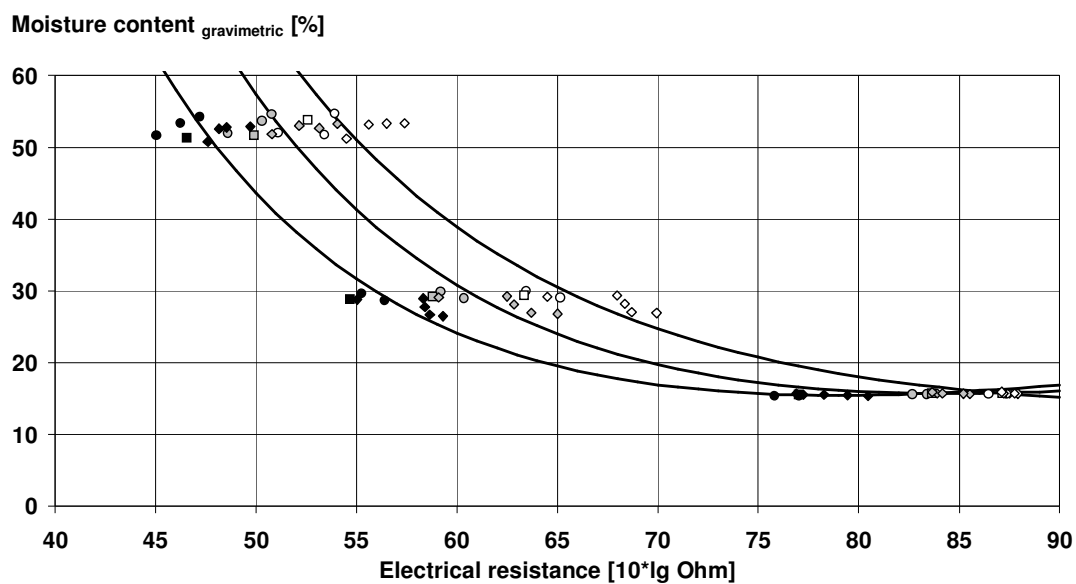


Figure 7.2-4. Resistance characteristic for spruce (○ = provenance 1, □ = provenance 2, ◇ = provenance 3, black filled marks = 36°C, grey filled marks = 20°C, non-filled marks = 4°C).

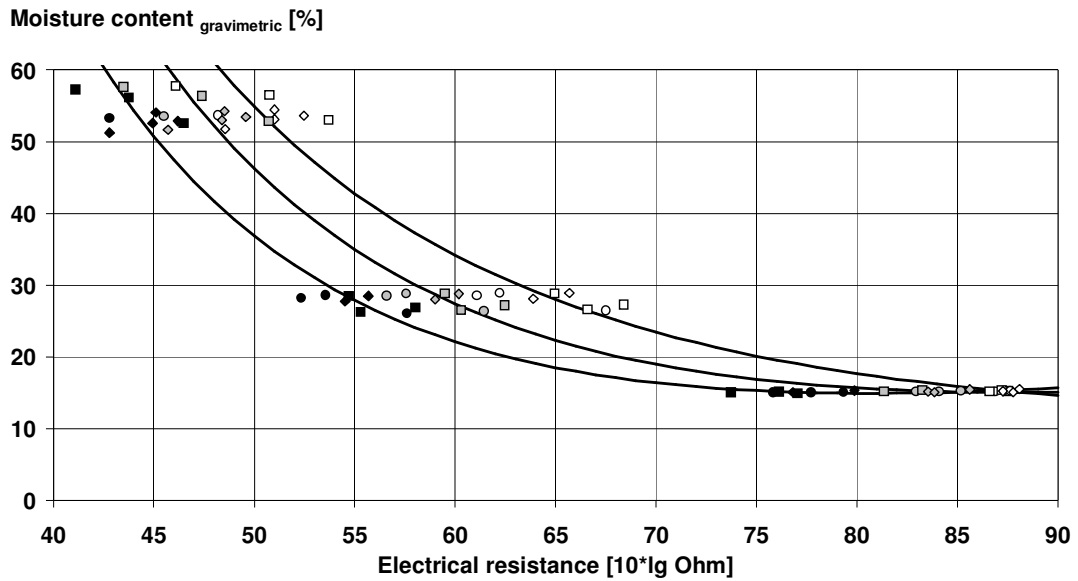


Figure 7.2-5. Resistance characteristic for Scots pine sapwood (○ = provenance 1, □ = provenance 2, ◇ = provenance 3, black filled marks = 36°C, grey filled marks = 20°C, non-filled marks = 4°C).

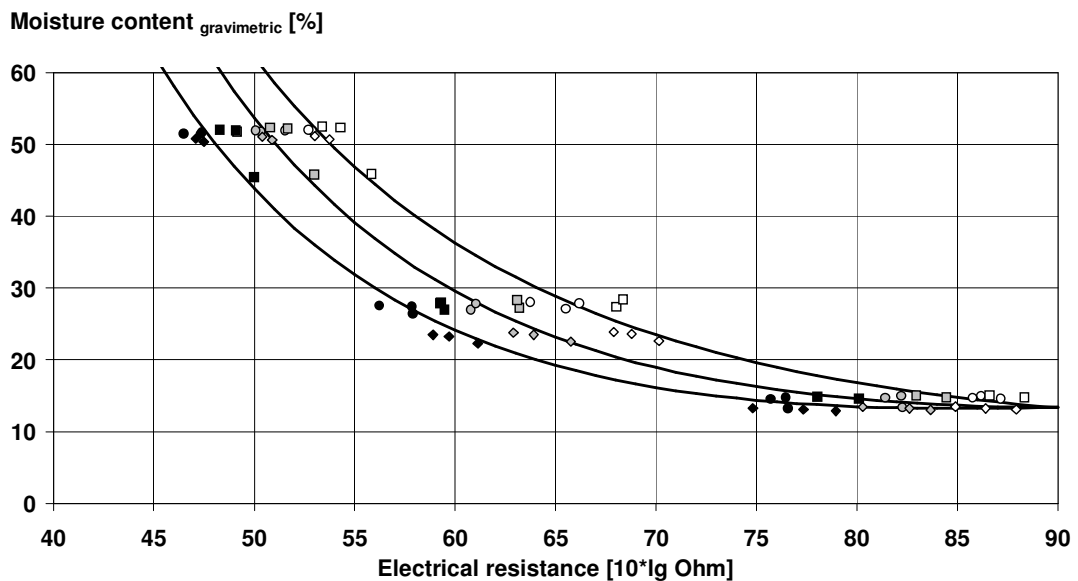


Figure 7.2-6. Resistance characteristic for Douglas fir (○ = provenance 1, □ = provenance 2, ◇ = provenance 3, black filled marks = 36°C, grey filled marks = 20°C, non-filled marks = 4°C).

From Figure 7.2-4 to Figure 7.2-6 can be seen that the course of the resistance characteristics differs not only between the wood species, but also between the three different provenances. Therefore the MC was calculated separately for the different provenances and additionally for all provenances of a species pooled together. A two-step approach was applied in this study: Firstly, the regression

equations in Table 7.2-6, which were obtained by the method of least squares, were considered for the calculation of the moisture content at a temperature of 20°C ($MC_{20^\circ C}$). Secondly, the influence of the temperature on the electrical resistance (R) was considered in terms of correcting the MC_T by a temperature compensation factor C_T as the following:

$$MC_T = MC_{20^\circ C} + C_T \quad (1)$$

Table 7.2-6. Regression equations of resistance characteristics at 20°C for Norway spruce, Scots pine sap and Douglas fir heart based on the different provenances (1-3) and on all provenances pooled together.

Species	Provenance	$MC_{20^\circ C}$ [%]
Norway spruce	1	$512042.751 \cdot (10 \lg R)^{-2.090164} - 1453.202 \cdot (10 \lg R)^{-0.390780} + 224.139$
	2	$512042.767 \cdot (10 \lg R)^{-2.081273} - 1465.255 \cdot (10 \lg R)^{-0.337258} + 293.831$
	3	$512042.919 \cdot (10 \lg R)^{-2.029077} - 1583.831 \cdot (10 \lg R)^{-0.272779} + 424.797$
	all	$512042.767 \cdot (10 \lg R)^{-2.064137} - 1465.248 \cdot (10 \lg R)^{-0.334548} + 293.847$
Scots pine sap	1	$205374.406 \cdot (10 \lg R)^{-1.974893} - 968.075 \cdot (10 \lg R)^{-0.494454} + 90.923$
	2	$205374.569 \cdot (10 \lg R)^{-1.914759} - 1023.206 \cdot (10 \lg R)^{-0.402548} + 144.403$
	3	$205374.625 \cdot (10 \lg R)^{-1.896288} - 1041.797 \cdot (10 \lg R)^{-0.327135} + 213.664$
	all	$205374.625 \cdot (10 \lg R)^{-1.899652} - 1041.795 \cdot (10 \lg R)^{-0.327715} + 213.668$
Douglas fir	1	$1390587.879 \cdot (10 \lg R)^{-2.434878} - 827.785 \cdot (10 \lg R)^{-0.335629} + 172.505$
	2	$1390587.870 \cdot (10 \lg R)^{-2.456182} - 797.873 \cdot (10 \lg R)^{-0.493026} + 78.485$
	3	$1390587.875 \cdot (10 \lg R)^{-2.433124} - 815.704 \cdot (10 \lg R)^{-0.377869} + 136.909$
	all	$1390587.875 \cdot (10 \lg R)^{-2.432829} - 815.620 \cdot (10 \lg R)^{-0.369578} + 143.472$

A linear dependency between $\lg R$ and temperature, as described by Skaar (1964), was assumed and the temperature compensation factor C_T was determined as follows:

$$C_T = \frac{\Delta MC}{\Delta T} = \frac{MC_{36^\circ C} - MC_{4^\circ C}}{36 - 4} [\% / ^\circ C] \quad (2)$$

in which ΔT is the temperature difference between 4°C and 36°C and ΔMC is the difference in electrically measured MC between 4°C and 36°C.

In addition, the influence of temperature on the measurement differs between the wood species and depends on the MC. Therefore the compensation factor C_T needs to be determined separately for each wood species, provenance, and MC. The regression equations in Table 7.2-7 were used for the calculation of the temperature compensation factor C_T .

Table 7.2-7. Regression equations of the temperature compensation factor C_T in relation to the electrical resistance of the wood for Norway spruce, Scots pine sap and Douglas fir heart based on the different provenances (1-3) and on all provenances pooled together.

Species	Provenance	C_T [%/°C]
Norway spruce	1	$-0.0000108 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0025533 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.2118686 \cdot (10 \lg R) + 6.2304876$
	2	$-0.0000129 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0030618 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.2564196 \cdot (10 \lg R) + 7.5635011$
	3	$-0.0000133 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0031598 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.2674947 \cdot (10 \lg R) + 8.0747234$
	all	$-0.0000114 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0027042 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.2278660 \cdot (10 \lg R) + 6.8569967$
Scots pine sap	1	$-0.0000013 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0003590 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.0420241 \cdot (10 \lg R) + 1.8204137$
	2	$-0.0000015 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0004120 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.0501462 \cdot (10 \lg R) + 2.2482478$
	3	$-0.0000011 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0003297 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.0437547 \cdot (10 \lg R) + 2.0633359$
	all	$-0.0000019 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0005006 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.0569046 \cdot (10 \lg R) + 2.3903511$
Douglas fir	1	$-0.0000018 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0004961 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.0565622 \cdot (10 \lg R) + 2.3822573$
	2	$0.0000032 \cdot (10 \lg R)^3 - 0.0006707 \cdot (10 \lg R)^2 + 0.0333667 \cdot (10 \lg R) + 0.1099423$
	3	$-0.0000059 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0014579 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.1315450 \cdot (10 \lg R) + 4.3150158$
	all	$-0.0000031 \cdot (10 \lg R)^3 + 0.0007999 \cdot (10 \lg R)^2 - 0.0791982 \cdot (10 \lg R) + 2.9270513$

The calculated MC is plotted against the gravimetrically determined MC in Figure 7.2-7 and Figure 7.2-8. The correspondence between calculated and determined values was much better when different provenances were considered separately. Although a linear regression could be assumed, the confidence interval of the single values was not constant. In contrast, with higher MC the maximum error linearly increased. Therefore, the upper and lower limitation curves were determined graphically indicating the maximum error at a confidence of 99%.

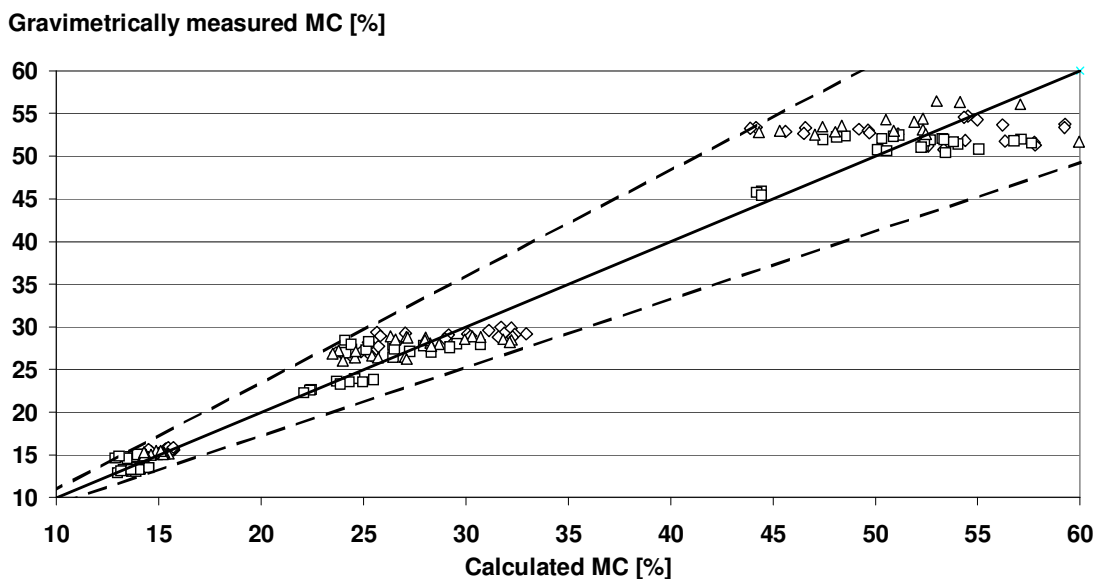


Figure 7.2-7. Calculated MC compared with gravimetrically measured MC. Underlying regressions were determined for all provenances pooled together (Δ = Scots pine sap, \square = Douglas fir, \diamond = Norway spruce).

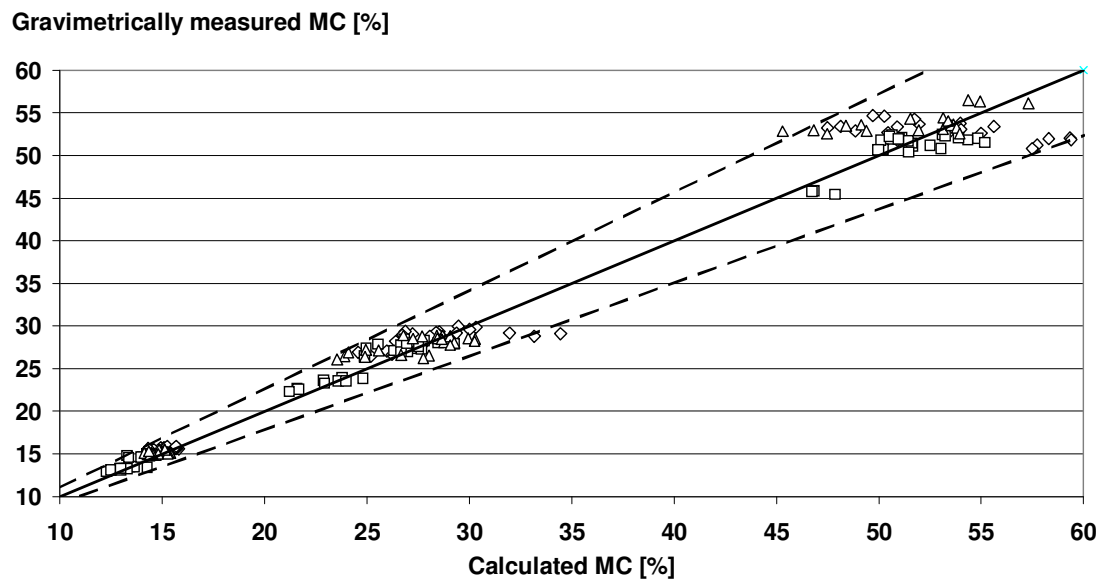


Figure 7.2-8. Calculated MC compared with gravimetrically measured MC. Underlying regressions were determined separately for the different provenances (Δ = Scots pine sap, \square = Douglas fir, \diamond = Norway spruce).

Variations in electrical resistance between different specimens of the same wood species and provenance maybe obtained due to differences in extractive content, density and anatomical structure [6, 15]. However, the overall result of the calibration experiments was a sufficiently high accuracy of the measurement system. The main objective – to detect critical moisture condition for fungal activity – proved to be achievable.

7.2.4 Results and discussion – field tests

The system was tested at 29 different exposure sites in Europe and the United States for 4-6 years of natural weathering with extreme changes in moisture content and temperature of the wood from -21 to $+55^{\circ}\text{C}$. No loosening or detectable abnormality in 541 pairs of electrodes was observed, and even after severe decay the connection between wood and conductive glue was still stable (Figure 7.2-9). All daily recorded values of resistance were plausible and showed little differences between replicates. The data logger operated with lithium/thionylchloride batteries worked for 5 years without any error.

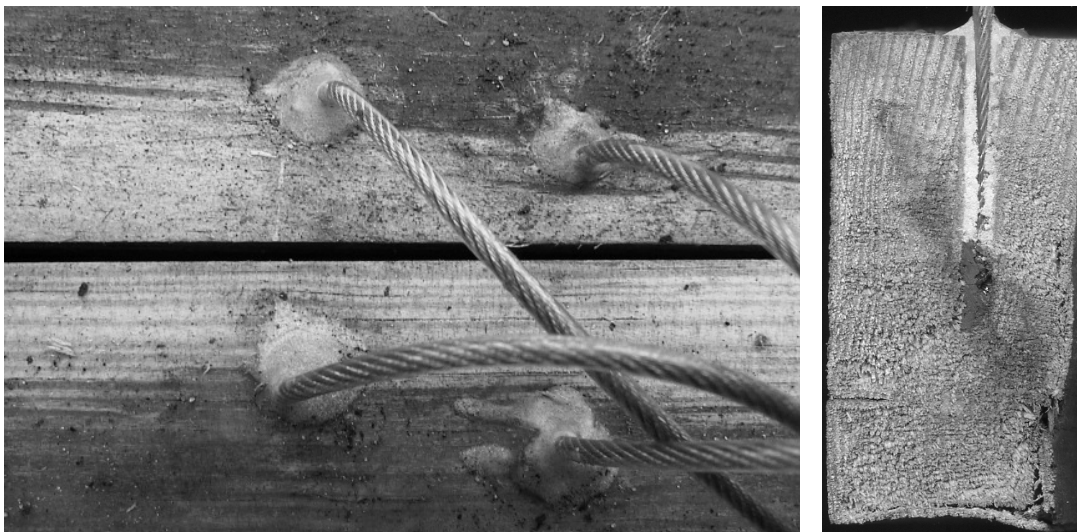


Figure 7.2-9. Glued electrodes in Scots pine specimens. Left: After six years in the field. Right: Cross cut through a glued electrode in wood decayed by severe white rot after four years of exposure.

7.2.5 Conclusions

The overall objective of this study was to find a suitable long-term moisture measuring and data recording system to be used in weathered conditions. Therefore different electrodes, conductive glues, and isolating glues in combination with mini data logger were investigated. Initially the use of standard copper cables as electrodes in combination with a copper based glue was examined. However, the sedimentation of the copper as well as the green discoloration indicating the production of copper ions through the reaction of acids in the wood and the copper discarded the copper based system for further applications. Consequently, graphite based glue and stainless steel cables were applied for field tests instead of copper containing glue and copper electrodes. Therefore the best performing mixture of the graphite glue was sought. Some mixtures of 1k solvent lacquer and 2k-epoxy resin based glues performed well. To get the same glue components for the isolating and the conductive glue a 2k-epoxy resin was chosen. With this combination a good resistance against the degradation of blue stain fungi and mould was achieved and problems occurring in long term use between different glue types were minimized. The resistance characteristics for three different wood species revealed a highly satisfactory accuracy of the measurement system. The need for wood-species specific resistance characteristics and temperature compensation became

obvious, to consider also different provenances of the timber is recommended, if possible.

The system was working steadily with no loosening of the electrodes and no obvious failure in measuring or data logging. Different applications of the system for moisture monitoring in field test studies and on buildings in service will be presented in a follow-up publication.

7.2.6 Acknowledgements

Thanks for excellent cooperation to T. Mugrauer, Mugrauer GmbH, Zorneding.

7.2.7 References


- [1] Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R. Decay influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering* 2007;1(3&4):91-107.
- [2] Schmidt O. *Wood and tree fungi. Biology, Damage, Protection, and Use.* Berlin: Springer-Verlag; 2006.
- [3] Stamm AJ. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 1927;19(9):1021-25.
- [4] Du QP, Geissen A, Noack D. The effect of temperature on the electrical resistance of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 1991;49:305-11.
- [5] Skaar C. Some factors involved in the electrical determination of moisture gradients in wood. *Forest Products Journal* 1964;14(6):239-43.
- [6] Lin, RT. Review of the electrical properties of wood and cellulose. *Forest Products Journal* 1967;17(7):54-60.
- [7] Müller, J. *Praxisnahe Untersuchungen zur Verhinderung von Holzschäden durch Pilze.* Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Germany, 2000.
- [8] Norberg, P. Monitoring wood moisture content using the WETCORR method. Part I: Background and theoretical considerations. *Holz als Roh- und Werkstoff* 1999;57:448-53.

- [9] Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R, Morsing N, Fynholm P, Welzbacher CR. Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay: Results from in-situ measurements on buildings. *Building and Environment* 2007. Submitted for publication.
- [10] Brischke C, Rapp AO. Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature, and fungal decay determined for 23 European test sites. *Wood Science and Technology* 2007. Submitted for publication.
- [11] EN 252, Wood preservatives. Field test methods for determining the relative protective effectiveness in ground contact. European Committee for Standardization 1990.
- [12] Smith WB, Yeo HM, Stark C, Morey B, Tascioglu C, Schneider P, Herdmann D, Freeman M. Use of moisture meters with treated wood. Document No. IRG/WP 07-40382. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden, 2007.
- [13] Welsh JK. A model for time-dependent DC conduction in moist wood. Dissertation, State University, College of Forestry, Syracuse, New York, United States, 1979.
- [14] James WL. Effect of temperature on readings of electric moisture meters. *Forest Products Journal* 1968;18:23-31.
- [15] Du QP. Einfluss holzartspezifischer Eigenschaften auf die elektrische Leitfähigkeit wichtiger Handelshölzer. Dissertation, Universität Hamburg, Germany, 1991.

7.3 Publikation III: Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay: Results from in-situ measurements on buildings.

Building and Environment. 2007, doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.001

ARTICLE IN PRESS


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com


Building and Environment ■■■■■ ■■■■■ ■■■■■


www.elsevier.com/locate/buildenv

Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on buildings

Christian Brischke^{a,*}, Andreas Otto Rapp^a, Rolf Bayerbach^b, Niels Morsing^c,
Peder Fynholm^c, Christian Robert Welzbacher^a

^a*Institute of Vocational Sciences in the Building Trade (IBW), Leibniz University Hannover, Herrenhäuser Straße 8, 30419 Hannover, Germany*
^b*PYTEC GmbH, Durchdeich 10, 21037 Hamburg, Germany*
^c*Danish Technological Institute (DTI), Taastrup, Denmark*

Received 6 June 2007; received in revised form 25 September 2007; accepted 1 October 2007

Abstract

Moisture has an important influence on fungal decay and therefore on the service life of wooden building components. The applicability of a long-term moisture recording system with glued electrodes was investigated on two different building objects: a cladding with different roof overhangs in Taastrup, Denmark, and a pedestrian timber bridge in Essing, Germany. Results after 2–4 years of in situ measurements are presented in this paper.

The measurement system was found to be applicable and provided plausible data on both objects. For measurements on the Essing bridge, the measurement system was modified by means of using electrodes containing wooden substitute dowels to avoid the gluing at site under adverse circumstances.

Moisture differences depending on the roof overhang and the distance to ground were identified and quantified within the cladding in Taastrup. Differently severe moisture conditions were observed for different building components of the Essing bridge, as well as weakening points of the construction in terms of moisture accumulation. Besides valuable information about variable moisture conditions within the examined objects, the use of automated moisture recordings provides an early warning system against increased decay hazards.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Cladding; Decay factor; Long-term moisture recording; Roof overhang; Substitute dowel; Timber bridge

1. Introduction

The "material climate" of wood, mainly determined by wood moisture content (MC), wood temperature, and their dynamics, has an essential influence on fungal decay and therefore on the service life of wooden building components [1]. To determine the "material climate" of wood, an automated system for long-term MC measurements with glued electrodes was developed and described in a previous paper [2]. This study deals with two different applications of the measuring system and provides results from a field study and measurements on a building in service.

The service life of wooden claddings, which are a typical application of timber in the wide-ranging European hazard class 3 [3], is influenced by a number of different factors. Moisture and temperature conditions of a cladding depend on the microclimate by means of orientation, shading, or distance to the ground as well as on the design level by means of roof overhangs or ventilation [4–9]. Therefore, in a first study the measurement system was applied on a wooden cladding to examine its moisture conditions in dependence of different roof overhangs.

Different approaches to predict the service life of wooden components do already exist [10,11], but a reliable database concerning wood durability in different exposures is still fragmentary [12]. The evaluation of in-service performance is the most realistic way to obtain data compared to field studies and laboratory tests. In situ measurements on

*Corresponding author. Tel.: +49 511 762 5829; fax: +49 511 762 3196.
E-mail address: brischke@ibw.uni-hannover.de (C. Brischke).

0360-1323/\$ - see front matter © 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.001

Please cite this article as: Brischke C, et al. Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on.... Building and Environment (2007), doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.001

By Christian Brischke^{a,*}, Andreas Otto Rapp^a, Rolf Bayerbach^b, Niels Morsing^c, Peder Fynholm^c, and Christian Robert Welzbacher^a

^a Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for Wood Biology and Wood Protection, Hamburg, Germany

^b Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for Wood Chemistry and Chemical Technology of Wood, Hamburg, Germany

^c Danish Technological Institute (DTI), Taastrup, Denmark

*corresponding author

Leuschnerstr. 91

21031 Hamburg

Tel.: +49-(0)40-73962-419

fax: +49-(0)40-73962-499

E-mail address: c.brischke@holz.uni-hamburg.de

Abstract

Moisture has an important influence on fungal decay and therefore on the service life of wooden building components. The applicability of a long-term moisture recording system with glued electrodes was investigated on two different building objects: A cladding with different roof overhangs in Taastrup, Denmark, and a pedestrian timber bridge in Essing, Germany. Results after 2-4 years of in-situ measurements are presented in this paper.

The measurement system was found to be applicable and provided plausible data on both objects. For measurements on the Essing bridge the measurement system was modified by means of using electrodes containing wooden substitute dowels to avoid the gluing at site under adverse circumstances.

Moisture differences depending on the roof overhang and the distance to ground were identified and quantified within the cladding in Taastrup. Differently severe moisture conditions were observed for different building components of the Essing bridge, as well as weakening points of the construction in terms of moisture accumulation. Besides valuable information about variable moisture

conditions within the examined objects, the use of automated moisture recordings provides an early warning system against increased decay hazards.

Keywords: Cladding, decay factor, long-term moisture recording, roof overhang, substitute dowel, timber bridge.

7.3.1 Introduction

The "material climate" of wood, mainly determined by wood moisture content (MC), wood temperature, and their dynamics, has an essential influence on fungal decay and therefore on the service life of wooden building components [1]. To determine the "material climate" of wood an automated system for long-term MC measurements with glued electrodes was developed and described in a previous paper [2]. This study deals with two different applications of the measuring system and provides results from a field study and measurements on a building in service.

The service life of wooden claddings, which are a typical application of timber in the wide-ranging European hazard class 3 [3], is influenced by a number of different factors. Moisture and temperature conditions of a cladding depend on the micro climate by means of orientation, shading, or distance to the ground as well as on the design level by means of roof overhangs or ventilation [4-9]. Therefore, in a first study the measurement system was applied on a wooden cladding to examine its moisture conditions in dependence of different roof overhangs.

Different approaches to predict the service life of wooden components do already exist [10,11], but a reliable data base concerning wood durability in different exposures is still fragmentary [12]. The evaluation of in-service performance is the most realistic way to obtain data compared to field studies and laboratory tests. In-situ measurements on buildings in service may therefore contribute to a better estimation of decay hazards and were applied in a second study: Moisture measurements on a pedestrian timber bridge, on which brown rot decay was detected before, were carried out. Here the use of preservative treated wooden substitute dowels was required due to the fact that gluing of electrodes was impossible on-site. The major aims were to identify

differences in the moisture regime between different building components on the one hand, and to investigate the suitability of the measurement system for its use as an early warning system against decay hazards on the other hand.

7.3.2 Materials and methods

Object 1: Cladding in Taastrup, Denmark

The objective of this study was to examine the influence of a roof overhang on the moisture conditions within a cladding. Therefore moisture measurements were conducted on a cladding (15 m long, 2.5 m high) with three different roof overhangs (12 cm, 62 cm, 112 cm) on the test site of the Danish Technological Institute (DTI) in Taastrup, Denmark (Table 7.3-1, Figure 7.3-1). The cladding was made from unmachined Norway spruce (*Picea abies* Karst.) boards of 1170x105x25 mm³, faced to the north, and carried out as a vertical, rear ventilated board-on-board cladding (Figure 7.3-2). The cladding was split into an upper and a bottom part, each with a height of 117 cm, separated from each other by a horizontal board, acting as a small roof overhang of 4.5 cm width. The distance between the boards of the bottom cladding and the ground was 15 cm.

Table 7.3-1. Characteristic data of sites.

Site	Geographic coordinates		Elevation [m]	Average air temperature [°C]	Sum of precipitation [mm]
	Latitude	Longitude			
Taastrup	55°38'49"N	12°17'50"E	14	8.6 ^{a)}	636 ^{a)}
Essing	48°56'18"N	11°46'51"E	362	8.5 ^{b)}	637 ^{b)}

^{a)}based on data from meteorological station in Copenhagen.

^{b)}based on data from meteorological station in Regensburg.

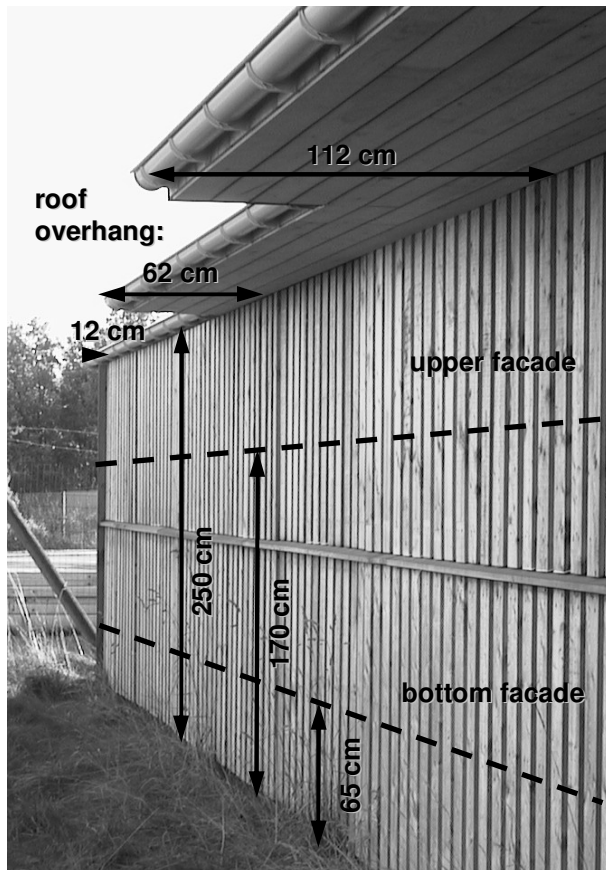


Figure 7.3-1. Board-on-board cladding with different roof overhangs in Taastrup, Denmark. Dashed lines mark the heights of measurement points on the upper and bottom parts of the façade.

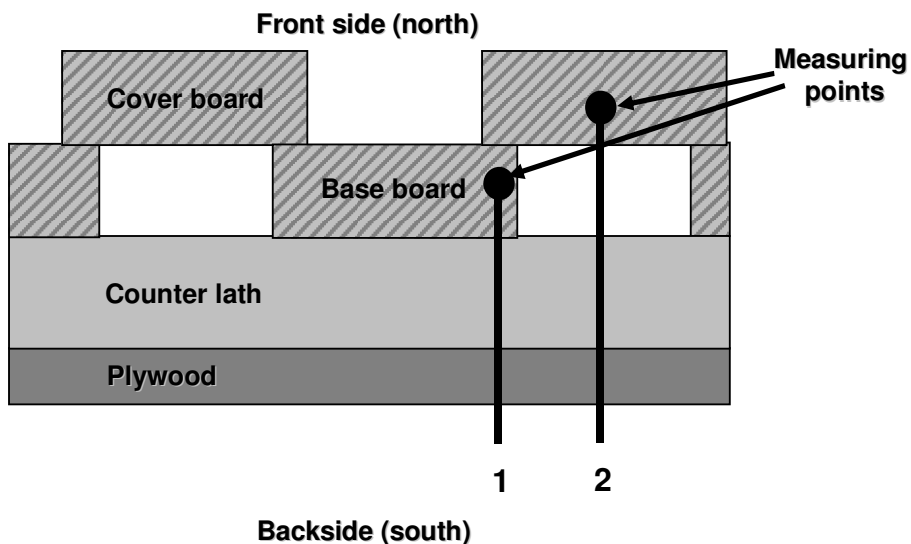


Figure 7.3-2. Cross cut through the cladding and schematic arrangement of the measurement points. Measuring point 1 installed in the overlapping zone of a base board; measuring point 2 installed centrally in a cover board.

Electrodes for MC measurements were glued in from the back of the cladding at two different heights, 65 cm and 170 cm. The installation of the electrodes is described in detail in the previous paper. In total 18 pairs of electrodes were installed, three for each roof overhang/height combination and connected to "Materialfox Mini" data logger (Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Germany) with three channels (Figure 7.3-2).

Object 2: Pedestrian timber bridge in Essing, Germany

General aspects

The pedestrian bridge in Essing, Bavaria, is a self-supporting timber bridge of 190 m total length and crosses the Main-Danube canal (Table 7.3-1, Figure 7.3-3). Apart from the wooden pedestrian planking, the whole construction was made from Norway spruce gluelam, which was brush treated with an oil-borne preservative and a water-repellent after completion. The bridge was built in 1987, a first damage on the main trusses caused by brown-rot fungi was detected in 1997, and the bridge was sanified afterwards. After a second damage by wood-destroying fungi, which occurred behind nail plates at the bottom of the construction in 2003, moisture monitoring devices were installed at different components of the bridge.



Figure 7.3-3. Self-supporting pedestrian timber bridge in Essing, made from Norway spruce gluelam: ① Bottom nail plates, ② region above bottom nail plates for installation of measuring points remote from the nail plates, ③ upper nail plates, ④ main trusses covered with plywood.

The objective of this study was to install devices for long-term moisture recordings on selected wooden components of the bridge, and to correlate the obtained MC data with occurring damages by wood-destroying fungi. In addition, devices for measuring and recording temperature, relative humidity and rainfall were installed on the bridge. Hereby the automated recordings should provide an early warning system as well as information on the influence of MC, wood temperature, and some climate factors on the onset of decay on buildings, especially next to water.

The installation of electrodes on the Essing bridge revealed two major problems:

1. Some electrodes needed to be glued in from the underside of the beams, which meant to fill in the glue upside down.

2. Some measurement sites showed already decay before installation, or the onset of decay could be expected soon, respectively.

Therefore the suitability of preservative treated and electrodes-containing substitute dowels for MC measurements was examined in a preliminary study to avoid the installation of electrodes in the field on the one hand, and a to avoid direct contact between decayed wood and the electrodes on the other hand.

Suitability of substitute dowels for moisture measurements

To examine the applicability of preservative treated wood for substitute dowels, the influence of different organic wood preservatives on the electric conductivity of wood was examined. Axially matched specimens of 50x2.5x50 mm³ (long. x tan. x rad.) were vacuum-pressure impregnated (15 min/20 mbar abs.; 15 min/9 bar abs.) with three different organic wood preservatives (Table 7.3-2). After impregnation and drying, two grooves (1.5 mm deep, 3 mm wide) with a distance of 30 mm from each other were cut into the specimens. The grooves ran parallel to the grain for one half of the specimens, and orthogonal to the grain for the other half. Stainless steel cables (Ø 1.5 mm) were glued into the grooves with a graphite-containing conductive epoxy resin. MC measurements were carried out with a moisture meter type GANN Hydromette RTU 600 after storage at 30°C in a drying oven for 90 h, at 20°C/65%RH for 9 d, and at 20°C/98%RH for 9 d.

Table 7.3-2. Organic wood preservative formulations examined with respect to their influence on electric conductivity.

ID	Wood preservative	Concentration of active ingredients
P1	Koranol Holzbau DV, Obermeier GmbH & Co KG, Germany	1.50% propiconazole 0.06% cyfluthrine 0.23% IPBC
P2	special formulation, Obermeier GmbH & Co KG, Germany	1.50% propiconazole 1.50% tebuconazole
P3	Wolvac L0-F, Dr. Wolman GmbH, Germany	0.80% propiconazole 0.01% farox

The suitability of wooden dowels with glued electrodes for MC measurements was examined by comparative gravimetric (MC_{grav}) and electric measurements (MC_{res}). Therefore 24 pine sapwood dowels (Ø 13 mm, 60 mm long) were

prepared. One half was provided with electrodes as follows (Table 7.3-6): Two holes (\varnothing 2 mm) with a depth of 15 mm and 60 mm and a distance of 5 mm to each other were drilled in axial direction into the dowels. In analogy to the method described in the previous paper, two stainless steel cables were glued in the holes with a graphite-containing conductive glue. The drilling holes were sealed with an isolating epoxy resin (Figure 7.3-4). Thus, the electrical resistance was measured over a distance of 30 mm in axial direction with an offset of 5 mm orthogonal to the grain.



Figure 7.3-4. Longitudinal cut through a substitute dowel made from Scots pine sapwood, impregnated with tebuconazole in white spirit, containing a pair of glued electrodes.

To simulate the influence of natural weathering on the connection between electrode, conductive glue, and wood, one half of the dowels was stressed artificially by a water vacuum-pressure impregnation (15 min/20 mbar abs.; 15 min/9 bar abs.) followed by drying at 60°C in a drying oven for 24 h. MC measurements were carried out with a moisture meter type GANN Hydromette RTU 600 on specimens with electrodes, and gravimetrically on specimens without electrodes after storage at 20°C/65%RH for 4 d, and at 20°C/98%RH for 22 d. All pre-treatments of wooden dowels can be seen from Table 7.3-6.

Installation of measurement devices

In total, 64 wooden substitute dowels were installed on the Essing bridge in May 2004. The measurement points were selected with respect to differences between weather side and non-weather side, and to the influence of nail plates in different heights of the construction (Figure 7.3-3, marks ①, ②, and ③). These plates act as a connection between single gluelam beams in the piers of the bridge. In addition, dowels were installed in the main trusses of the bridge, where firstly decay was observed in 1997, but which were afterwards protected

from rain water by plywood covers (Figure 7.3-3, mark ④). Here, the efficacy of this protective measure should be verified.

For MC recording "Materialfox Mini" data logger were applied, each connected to 2 or 3 substitute dowels. In addition to the MC measurements, daily relative humidity and air temperature were recorded at four different sites on the bridge using "Hygrofox Mini" data logger. All data logger were provided by Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Germany. During a yearly inspection all data were collected from the logger and the timber around the measuring points was assessed visually with respect to the onset of decay.

7.3.3 Results and discussion

Object 1: Cladding in Taastrup, Denmark – Roof overhang effects on moisture conditions

The system applied for measuring the MC within different parts of the cladding provided plausible values over the whole period of examination (Figure 7.3-5). The MC ranged between 15 and 30% over the year. MCs above 25%, which can become critical for the onset of fungal decay [13], were found between November and March. However, the risk of fungal decay during those months was limited, because of coinciding low temperatures.

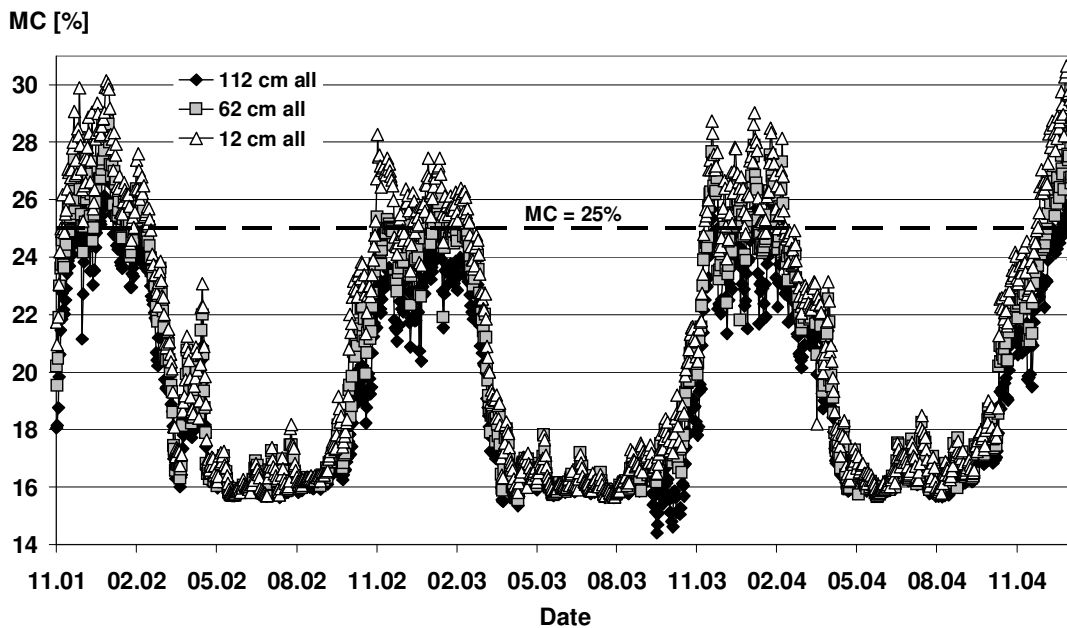


Figure 7.3-5. Moisture course in boards of the upper facade for different roof overhangs.

The number of wet days differed significantly between different measuring points of the cladding. Therefore the number of days above certain MCs (MC=20, 23, 25, 27, and 30%) over the whole measuring period is listed in Table 7.3-3 and Table 7.3-4. The most distinctive differences between the measuring points were found for the number of days above MC=25%. Significantly less wet days of the upper facade compared to the bottom facade were found to depend strongly on the roof overhang (Table 7.3-3). With increasing roof overhang the difference between upper and bottom facade was stronger pronounced so that the upper facade with 112 cm roofing showed only 56 days above MC=25% compared to 252 days on the bottom facade. In general, the differences in the number of wet days between 112 cm and 62 cm roof overhang were more pronounced compared to differences between 62 cm and 12 cm.

Table 7.3-3. Days with a moisture content above 20, 23, 25, 27, and 30% for different roof overhangs in the upper and bottom part of the cladding (based on a total exposure interval of 1145 days).

Roof overhang	Facade	Days with MC >				
		20%	23%	25%	27%	30%
112 cm	upper	456	263	56	2	0
	bottom	608	447	252	34	0
62 cm	upper	526	373	194	30	0
	bottom	557	416	286	81	0
12 cm	upper	550	425	304	119	5
	bottom	555	444	299	103	3

Table 7.3-4. Days with a moisture content above 20, 23, 25, 27, and 30% for base and cover boards in the upper and bottom part of the cladding (based on a total exposure interval of 1145 days).

Facade	Board type	Days with MC >				
		20%	23%	25%	27%	30%
upper	base boards	516	362	165	22	0
	cover boards	517	367	182	35	0
bottom	base boards	559	409	253	47	0
	cover boards	567	429	289	81	0

Possible reasons for MC differences between differently oriented facades were mentioned by Nore *et al.* [8]: Besides the stronger influence of wind-driven rain on west walls compared to east walls, solar radiation and wind play an important role for drying processes. As the facade, examined in this study, was faced to north, the influence of direct solar radiation as well as the influence of wind-driven rain are very limited.

The number of wet days was also significantly lower for the base (e.g. 165 days above MC=25% in the upper facade) compared to the cover boards (182 days) of the cladding (Table 7.3-4), although the electrodes in the base boards were installed, where they were overlapped by the cover boards and hindered drying could be expected (*cf.* measuring point 1 in Figure 7.3-2).

Object 2: Pedestrian timber bridge in Essing, Germany

Suitability of substitute dowels for moisture measurements

Significant differences in MC, measured parallel to the grain, were found between P2 and P3, and between P2 and untreated pine sapwood after conditioning in 20°C/65%RH (Table 7.3-5). No significant influence of the preservative impregnation on the electric resistance of pine sapwood was

observed for P1 and P3, neither for measurements parallel, nor orthogonal to the grain. Further on P3 was used for impregnation of wooden dowels.

Table 7.3-5. Electrically measured moisture content (MC) of untreated and differently preservative treated pine sapwood specimens parallel and orthogonal to the grain after conditioning in different climates (P1 = Koranol Holzbau DV, P2 = special formulation, P3 = Wolvac L0-F). Standard deviation in brackets.

Conditioning	Treatment	MC [%]	
		parallel to grain	orthogonal to grain
30 °C/drying oven, 72 h	untreated	6.0 (1.0)	4.5 (0.1)
	P1	6.3 (0.4)	4.2 (0.3)
	P2	5.2 (1.9)	5.2 (0.8)
	P3	5.2 (0.4)	4.7 (1.0)
20 °C/65%RH, 9 d	untreated	9.4 (0.2)	7.7 (0.2)
	P1	9.0 (0.4)	7.3 (0.3)
	P2	8.7 (0.2)	7.6 (0.2)
	P3	9.1 (0.1)	7.4 (0.2)
20 °C/98%RH, 9 d	untreated	20.4 (1.0)	19.9 (0.4)
	P1	20.5 (0.7)	19.4 (0.2)
	P2	19.6 (0.2)	20.0 (0.2)
	P3	20.3 (0.7)	19.7 (0.2)

The comparative measurements on wooden dowels revealed only slight differences between gravimetrically (MC_{grav}) and electrically (MC_{res}) determined MC values (Table 7.3-6). After conditioning at 20 °C/65%RH the MC_{grav} was approx. 1%-point lower compared to the MC_{res} , after conditioning in 20 °C/98%RH MC_{res} was slightly lower than MC_{grav} . Furthermore, neither a significant influence of the wood preservative, nor of the artificial pre-stress was observed. Thus, the differences between both measurement systems seemed to be negligibly small and the use of wooden substitute dowels suitable for in-situ MC measurements.

Table 7.3-6. ID, treatment, and moisture content (MC) of pine sapwood dowels, partly with installed electrodes for electrical measurements (E), partly pre-stressed (S), and partly treated with an organic wood preservative (T) after different conditioning regimes (n=3 for each combination).

ID	Impregnation with Wolvac L0-F	Glued electrodes	Artificially stressed	MC [%] ^a	
				after 4 d in 20°C/65%RH	after 22 d in 20°C/98%RH
U	no	yes	no	11.7 (0.1)	21.6 (0.0)
UE	no	yes	yes	12.4 (0.3)	20.8 (0.3)
US	yes	yes	no	11.7 (0.0)	21.6 (0.0)
UES	yes	yes	yes	12.6 (0.2)	20.2 (0.1)
T	no	no	no	11.6 (0.3)	21.6 (0.5)
TE	no	no	yes	12.9 (0.3)	21.3 (0.7)
TS	yes	no	no	11.6 (0.2)	21.3 (0.7)
TES	yes	no	yes	11.9 (0.3)	19.7 (0.2)

^aMC of dowels without electrodes was determined gravimetrically.

Moisture courses in selected building components

The long-term moisture recordings on the Essing bridge provided plausible values over the whole measuring period of two years. The main findings are displayed in Figure 7.3-6, showing exemplarily the moisture courses of selected building components in comparison, and can be summarized as follows:

- Higher MCs were found on the weather side of the bridge compared to the non-weather side at all times. This is shown in Figure 7.3-6a for two measurement sites on the same pier. On the weather side the MC increased up to 50% during winter, whereas the MC on the non-weather side stayed below 30%.
- The MC close to the bottom nail plates was significantly higher as remote from (directly above) the plates for most of the examined piers (Figure 7.3-6b). This coincides with severe decay in eight different beams, which was unexceptionally found close to bottom nail plates.
- The risk of moisture accumulation close to the upper nail plates was found to be significantly lower compared to the bottom nail plates (Figure 7.3-6c). However, the MC close to some upper nail plates on the weather side was equal to that close to the corresponding bottom nail plates, but never higher.
- The MC in areas with decay (here: brown rot decay) was drastically increased, and as decay was found only behind nail plates, the wood did not dry out again (Figure 7.3-6d).

- The plywood sheets, which cover the main trusses of the bridge, were found to be an effective protective measure; the MC in the trusses never exceeded 25% (Figure 7.3-6e).
- Differences in relative humidity and air temperature between different parts of the bridge (close to/ apart from the water) were negligibly small.

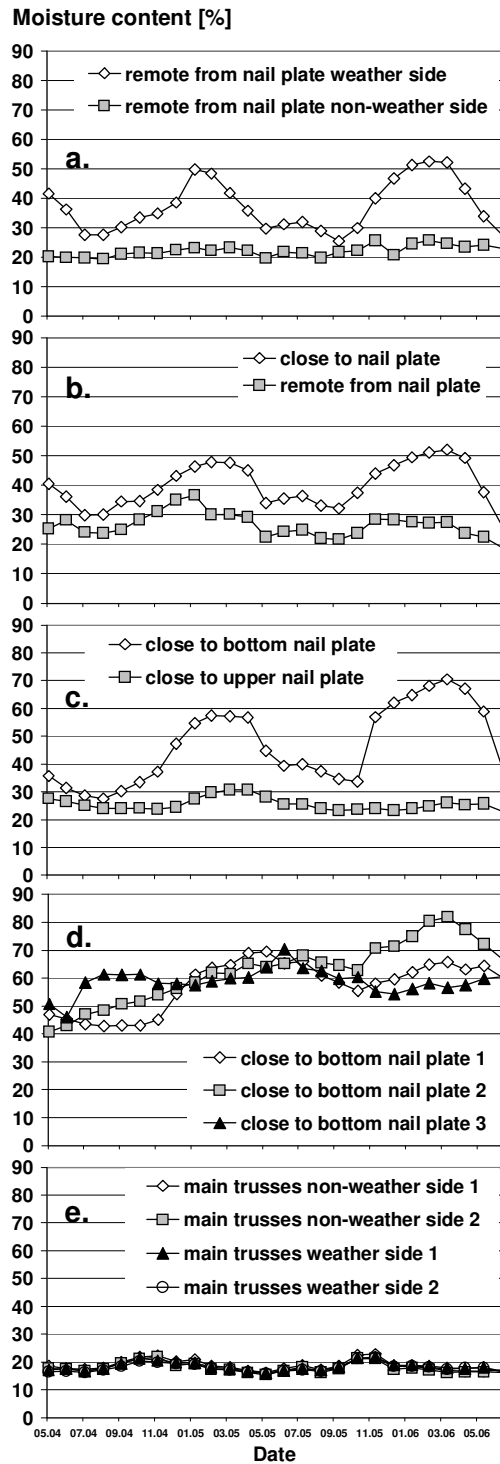


Figure 7.3-6. Examples of monthly mean moisture content courses in comparison between selected distinctive building components of the Essing bridge. (a) Course of MC in piers on the weather and the non-weather side, remote from nail plates, (b) Course of MC in a pier close to and remote from a nail plate, (c) Course of MC close to a bottom and an upper nail plate, (d) Courses of MC in three piers of the weather side close to bottom nail plates, already showing decay, (e) Courses of MC for four measuring points on the plywood covered main trusses on the weather and the non-weather side.

The results after two years showed the suitability of the measurement system, especially in combination with preservative treated substitute dowels, for long-term moisture monitoring on buildings in service. Differently severe decay hazards in terms of MC, e.g. between the weather side and the non-weather side of the bridge, were detected and quantified. The use of the measurement system as an early warning system for the onset of decay in the bridge piers seems to be dispensable as the MC values are here extremely high in general. However, in case of the main trusses, where effective protective measures were applied, the detection of irregularly high moisture as a precondition for fungal decay is possible. In combination with an alarm device, leakages or otherwise caused irregular moisture accumulations can be detected at an early stage before the onset of decay. To minimize the number of measurement and alarm devices the electrode pairs can be connected parallel with only one data logger. As soon as the MC at only one measurement point exceeds a certain limit, the alarm will be set off. Such MC based warning systems can be of high benefit for the conservation of wooden constructions as well as for monitoring of ancient or recent buildings.

Some building codes allow to avoid chemical wood preservation for load-bearing components in interior dry applications, provided that a potentially occurring damage by insects is detectable at an early stage (e.g. so called hazard class 0, [14]). If this idea is transferred to moisture/fungal hazards, the new tool could be used to detect a hazard also at an early stage and help to avoid biocides in buildings and environment.

7.3.4 Conclusions

The MC measurement system was applicable in both studies and provided plausible data. The modification of the system by means of preservative treated wooden substitute dowels allowed also measurements in decayed wood and on buildings, where an in-situ installation of glued electrodes was impossible. The objectives of the different studies were fulfilled. Firstly, the MC measurements on the wooden cladding revealed differences in the number of wet days between different roof overhangs and between selected parts of the wall. For implementation of the moisture data in a prediction model, a more

comprehensive approach, considering also the influence of wall orientation, external shading, and splash water at ground level will be helpful and is therefore in progress.

Secondly, the moisture courses from the Essing bridge partly revealed extremely different decay potentials between the building components, such as between weather and non-weather side. It was clearly shown, that the bridge is insufficiently protected by design in general. The nail plates, especially at the bottom part of the construction, were figured out as weak points in detail.

The moisture monitoring method proved to be suitable for the detection of critical moisture conditions by means of a possible fungal infestation as shown for the main trusses. However, in case of the generally extreme high moisture induced risk of fungal decay of the support structure, the application of an early warning system becomes redundant. Nevertheless, such warning systems may allow the renunciation of wood preservatives in certain applications within European hazard class 1 and 2, and the establishment of a hazard class 0 regarding fungal decay appears as an option.

7.3.5 Acknowledgements

The authors would like to express their special thanks to the Office of Waterways and Shipping, Nürnberg-Riedenburg, and the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Karlsruhe, Germany for funding and practical support.

7.3.6 References

- [1] Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R. Decay influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering* 2007;1(3&4):91-107.
- [2] Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R. Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment* 2007. Submitted for publication.

-
- [3] EN 335-1, Hazard classes of wood and wood-based products against biological attack. Classification of hazard classes. European Committee for Standardization 1992.
 - [4] Böttcher P. Zum Verhalten unterschiedlich feuchtedurchlässiger Anstriche auf einigen einheimischen Holzarten bei natürlicher Bewitterung. Holz als Roh- und Werkstoff 1975;33:116-20.
 - [5] Willeitner H, Schwab E. Holz – Außenverwendung im Hochbau. Stuttgart: Alexander Koch GmbH; 1981.
 - [6] Trübswetter T. Gefährdung bewitterter Bauteile. In: Tagungsband zur 22. Holzschutztagung der DGfH, Bad Kissingen, Germany, October, 17th-18th 2000.
 - [7] Pöhlmann R. Untersuchungen zur Bewitterungsbeanspruchung an einem Objekt in ökologischer Holzbauweise. Diploma thesis, University of Hamburg, Germany, 2001.
 - [8] Nore K, Thue JV, Time B, Rognvik E. Ventilated wooden cladding – a field investigation. 7th Nordic Building Physics Symposium, Reykjavik, Iceland, June 13th-15th 2005.
 - [9] Sahal N, Lacasse MA. Water entry function of a hardboard siding-clad wood stud wall. Building and Environment 2005;40:1479-91.
 - [10] Leicester RH, Wang C-H, Nguyen MN, Thornton JD, Johnson G, Gardner D, Foliente GC, MacKenzie C. An engineering model for the decay of timber in ground contact. Document No. IRG/WP 03-20260. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden, 2003.
 - [11] Leicester RH, Wang C-H, Nguyen MN, Foliente GC. Engineering models for biological attack on timber structures. In: Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components, TT4-217, Lyon, France, 2005.
 - [12] Brischke C, Rapp AO. Relation between lab tests, field tests, and in-service performance and their contribution to SLP. In: Proceedings of COST E37 Workshop, 19th-21st June 2005, Oslo, Norway.
 - [13] Schmidt O. Wood and tree fungi. Biology, Damage, Protection, and Use. Berlin: Springer-Verlag; 2006.

- [14] DIN 68800-3, Holzschutz im Hochbau. Vorbeugender chemischer Holzschutz. Deutsches Institut für Normung 1990.

7.4 Publikation IV: Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field - Observations in different micro-climates

Wood Science and Technology. 2007, Submitted for publication.

by **Christian Brischke*** and **Andreas Otto Rapp**

Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for Wood Biology and Wood Protection, Leuschnerstr. 91, D-21031 Hamburg, Germany

* communicating author

Phone: +49-(0)40-73962-419

Fax: +49-(0)-73962-499

c.brischke@holz.uni-hamburg.de

Abstract

In this study Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and Douglas fir heartwood (*Pseudotsuga menziesii* Franco) specimens were exposed in double layer field trials at four different exposure sites and under different exposure conditions (in total 10 test sets). The material climate of wood in terms of wood moisture content (MC) and wood temperature was automatically monitored over a period of six years and compared with the progress of decay. The aim of this study was to highlight the interrelationship between microclimate, material climate, and decay as a basis for the establishment of dose-response functions to be used for service life prediction of wood and wood-based products.

Differences in resulting decay dynamics between the test sites as well as between the different types of exposure were quantified and discussed with respect to corresponding microclimatic and material climatic conditions. Differently long time lags between the beginning of exposure and the first occurrence of visible decay seemed to have an impact on the total decay development. The fundamental importance of direct decay factors, such as MC and wood temperature were underlined and basic requirements for establishing dose-response-functions to be used in service life prediction models were derived.

7.4.1 Introduction

Timber use in outdoor applications is compromised by means of biological degradation. The service life of timber constructions is influenced by numerous factors, both wood-inherent properties and environmental influences. Several field studies concerning wood durability revealed significant differences in service life of wood at different exposure sites (Edlund 1998; Leicester et al. 2005; Wakeling 2006a; Augusta 2007). Site-specific climate can have an essential influence on decay and should therefore be considered for service life estimations. Different climate levels can be distinguished: The macroclimate (described by weather data of the site), the mesoclimate (described by influences that are provoked by the environmental situation at the site, e.g. shading, windbreaks), and the microclimate (described by the situation at and within a construction). The key factors for fungal growth and decay are wood moisture content (MC) and wood temperature and their dynamics (Viitanen and Ritschkoff 1991; Viitanen 1997; Rydell et al. 2005), which combine to produce the "material climate" in the wood (Brischke et al. 2006). While the role of these factors is well known, the relationships between climate, wood conditions and subsequent decay remain poorly understood. The aim of this study was therefore to look after differences in material climate under various microclimatic conditions to provide a better understanding of the relationship between climate and fungal decay. Automated recordings of wood moisture content and wood temperature were applied on double layer field trials at four different German test sites, each with different exposure situations (artificial shade, tropical greenhouse), and compared with the progress of decay as a basis for establishing dose-response functions to be used for service life prediction of wood.

7.4.2 Material and methods

Field tests

Field test specimens from pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and Douglas fir heartwood (*Pseudotsuga menziesii* Franco) were monitored in terms of MC, wood temperature, and the progress of fungal decay for six years. The

specimens (500x50x25 mm³), according to EN 252 (1989), were exposed in double layer test rigs (Rapp and Augusta 2004) in 2000. The test rigs (Figure 7.4-1) consisted of specimens placed horizontally in two layers and exposed above ground producing a decay risk corresponding to European Hazard Class 3 (EN 335, 2006). The number and distribution of the specimens can be seen from Figure 7.4-2. The specimens were supported at the cut ends by beams of CCB-impregnated pine sapwood, separated with bitumen foil from the preservative-treated supports. The whole test set-up formed a closed deck (73x65x21 cm³) placed on paved ground or horticultural foil to avoid the growth of grass.

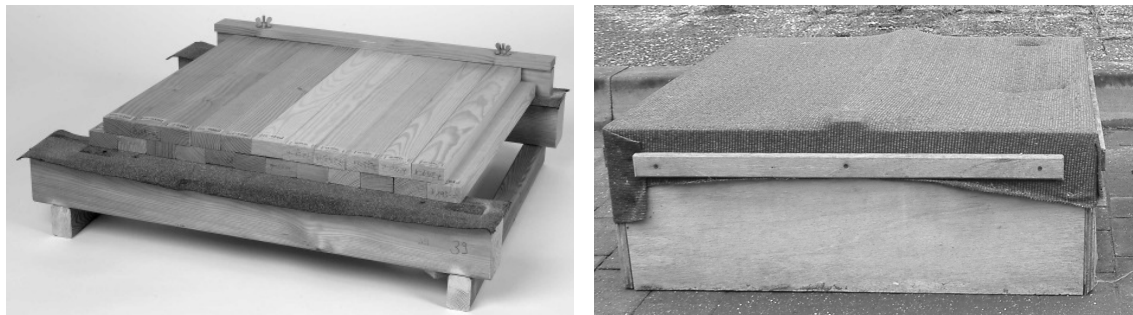


Figure 7.4-1. Left: Photograph showing the double-layer set-up with the upper layer shifted 25 mm horizontally to the lower layer. Specimens are separated with bitumen foil from CCB-impregnated support beams. Right: Artificial shading by textile sheet of double layer test set.

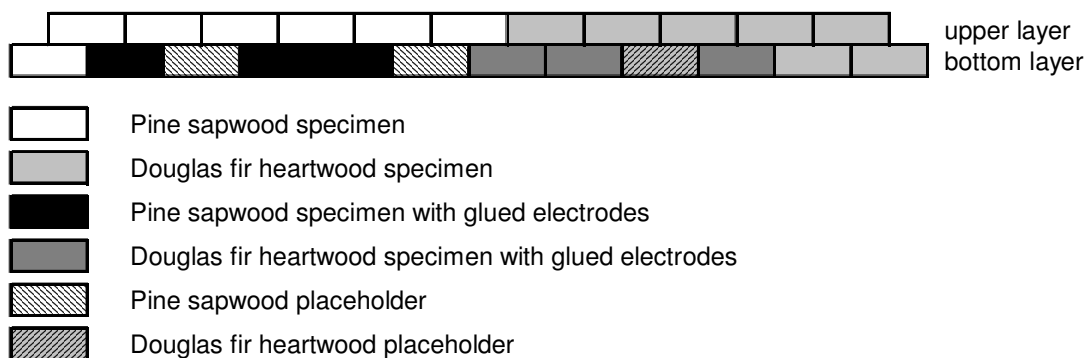


Figure 7.4-2. Scheme of double layer test set up and distribution of specimens containing electrodes for MC measurements.

The double-layer trials in this study were part of a larger investigation (Brischke and Rapp 2005) on the influence of different factors causing decay. The test set-ups were exposed at 32 sites in Europe and the United States, which were selected for their defined climates (one test rig at each site/for each exposure).

Climate data at all sites were available from adjacent official weather stations, where measurements of daily precipitation and average temperature were recorded.

The characteristic data for the four German sites at Hamburg, Reulbach, Freiburg, and Stuttgart, that were considered in this study, are listed in Table 7.4-1. In addition, these four sites were provided with a second test set exposed in artificial shade. The “shade sets” were put in plywood boxes (30x90x90 cm³) covered with fully water-permeable textile sheets, which were transmitting only 10% of the sunlight (Figure 7.4-1). Two additional sets at the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH) in Hamburg were exposed in a tropical greenhouse during the winter (Oct 15th – May 15th), and the whole year (Table 7.4-1). The exposure in shade boxes and in the tropical greenhouse was carried out to provoke changes in terms of the microclimate and to promote the conditions for decay.

Table 7.4-1. Characteristic data of the field test sites.

Test site	Test sets	Height above sea level [m]	Average temperature [°C]	Sum of precipitation [mm]
Hamburg	Hamburg sun/shade	35	10.6 ¹⁾	874 ¹⁾
	Greenhouse	35	21.6 ⁴⁾	6257 ³⁾
	Greenhouse winter	35	18.6 ⁴⁾	4092 ^{3) 4)}
Reulbach	Reulbach sun/shade	620	7.5 ²⁾	820 ¹⁾
Stuttgart	Stuttgart sun/shade	459	9.9 ²⁾	741 ¹⁾
Freiburg	Freiburg sun/shade	302	12.1 ¹⁾	911 ¹⁾

¹⁾ average of 2000-2005

²⁾ average of 2001-2005

³⁾ equivalent to a spraying of 120 l per week

⁴⁾ average of 2000-2004

Decay assessment

The specimens were evaluated yearly by rating the extent and distribution of decay according to EN 252 (1989) as: 0 (sound), 1 (slight attack), 2 (moderate attack), 3 (severe attack), or 4 (failure). The prevailing type of decay was identified for each species and exposure according to EN 15083-2 (2005).

Automated recordings of MC and wood temperature

The MC of three Scots pine sapwood and three Douglas fir heartwood samples in the bottom layer (Figure 7.4-2) of each test set was measured and recorded

once a day. The measurement system applied in this study was described in an earlier publication (Brischke et al. 2007a) and can be summarized in brief as follows: Electrodes of polyamide coated stainless steel cables were glued in holes predrilled to a depth of 25 mm. The end 5 mm of plastic coating was removed and put into a conductive glue; the rest of the hole was filled with an isolating epoxy. The steel cables were connected to a small data logger (Materialfox Mini, Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Germany), for recording the electrical resistance of the wood. Since electrical resistance measurements of wood below the freezing point produce anomalous values, days with a minimum temperature below 0°C were not considered. The data logger were calibrated in a range between MC=12% and MC=50% (Brischke et al. 2007a). Measurements above fiber saturation were found to become increasingly inaccurate, but still indicated a tendency within the calibration range.

The following temperature measurements were conducted directly on the wood specimens using Thermofox Mini data logger (Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Germany):

- Daily recording of average, minimum, and maximum temperature below the bottom layer of each test set
- Daily recording of average, minimum, and maximum temperature between the layers at the Hamburg, Stuttgart, Freiburg and Reulbach test sites for sun-exposed pine sapwood and Douglas fir, and shade-exposed pine sapwood.
- 2-h-readings of wood temperature between the layers of the sun-exposed and the shade-exposed test set in Hamburg over a period of 11 months.

7.4.3 Results and discussion

Decay progress

Pine sapwood decayed faster than Douglas fir heartwood in general (Figure 7.4-3a-e). However, decay of shaded Douglas fir in Stuttgart and Freiburg proceeded, after a time lag of 2 to 3 years, so fast, that it was more severely

decayed than sun-exposed pine sapwood after 5 to 6 years (Figure 7.4-3d, e). In Hamburg sun, Hamburg shade and Greenhouse winter decay on Douglas fir proceeded comparatively more slowly. This may be explained by the dominating rot type at the different sites: brown rot was the predominant decay type on Douglas fir in Stuttgart and Freiburg, where in Hamburg and in Greenhouse winter it was white rot. This comparatively higher decay progress by brown rot agrees with previous findings by Edlund (1998) and Augusta (2007).

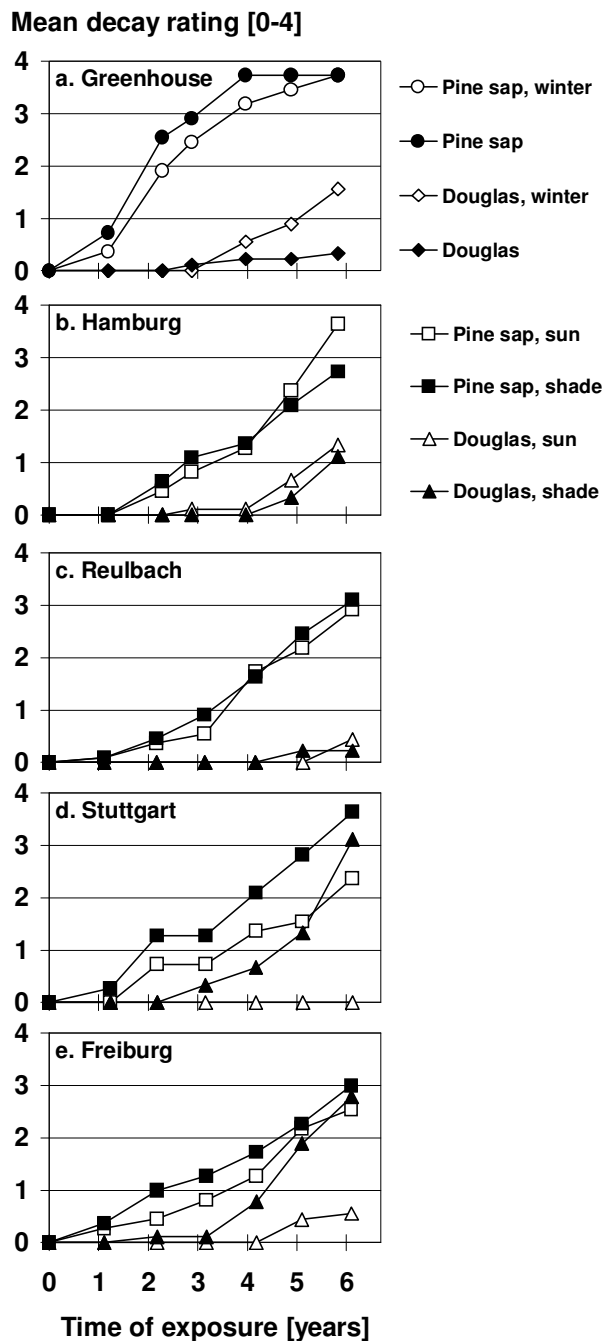


Figure 7.4-3. Mean decay rating of pine sapwood and Douglas fir heartwood specimens exposed above ground in horizontal double layers. Exposure in a tropical greenhouse (a) in Hamburg ran for one test set during the whole year and for a second test set between October 15th and May 16th (winter). At the test sites Hamburg (b), Reulbach (c), Stuttgart (d), and Freiburg (e) the test sets were exposed in the sun and in the shade.

The time lags, where nearly no decay occurred, differed among test sites as well as between sun and shade exposures. Decay on pine sapwood started immediately in the first year of exposure in the Greenhouse and at the Stuttgart and Freiburg sites, but was not detected in Hamburg and Reulbach until the

second year of exposure (Figure 7.4-3a-e). Even more variation was found between time lags for Douglas fir: two years in Stuttgart shade, but six years in Stuttgart sun (Figure 7.4-3d). Thus, the sigmoid courses of decay, especially in above-ground exposures (Preston et al. 2000, Augusta et al. 2004, Brischke et al. 2007b), are mainly determined by the time lag at the beginning of exposure, and needs therefore to be regarded for the prediction of service lives.

Fungal degradation of wood is a very complex process, which is influenced not only by material-inherent properties of wood (endogenous factors), but also by abiotic and biotic environmental influences (exogenous factors) (Brischke et al. 2006). Therefore, also various reasons are conceivable for the appearance of time lags between the beginning of exposure and detectable decay. Carey (2002a, b) isolated wood-destroying fungi from L-joint specimens after only 3 to 4 months, but the first visible signs of decay were not observed until three years of exposure. Thus, the onset of decay was somehow inhibited. Table 7.4-2 gives an overview of inhibitory effects on fungal activity, which potentially cause the delayed start of fungal decay.

Table 7.4-2. Potential inhibitory effects on fungal activity that could delayed the onset of decay.

Causation	Mode of inhibition/Effect	e.g. described by
Competition	Competition between wood-destroying and non-wood-destroying organisms for nutrients or habitats	Rypáček (1966); Henningsson (1967); Rayner and Boddy (1988); Schmidt (2006)
Antagonism	Inhibition of wood-destroying organisms by non wood-destroying organisms, e.g. by production of toxic metabolites or mycoparasitism	Jacquot (1967); Greaves (1970; 1972); Banerjee and Levy (1971); Behrendt et al. (1995); Schmidt and Müller (1996); Schmidt (2006)
Inhibitory extractives	Inhibition of fungal growth and decay by (e.g. toxic) extractives that can be inactivated by primary colonizers or leached out from the wood substrate Inhibition of spore germination by (e.g. toxic) extractives that can be inactivated by primary colonizers or leached out from the wood substrate	Findlay (1966); Arndt and Willeitner (1969); Gref et al. (2001); Stirling and Morris (2006) Morton and French (1966); Schmidt and French (1979); Lee et al. (1992) Eberhardt et al. (1994); Augusta (2007)
Wood preservatives	Inhibition of fungal growth and decay. Detoxification of wood preservatives by primary colonizers or leaching	Detoxification: Choi et al. (2003); Wallace and Dickinson (2004) Leaching: Greaves (1977); Leicester et al. (2005)
Insufficient permeability	Increasing permeability by colonization of the substrate with blue stain fungi or bacteria	Dunleavy and McQuire (1970); Boutelje and Hägglund (1988); Fojutowski (2005)
Hydrophobicity	Mitigation of hydrophobic properties of refractory, coated, or oil/wax-impregnated wood by weathering (UV, leaching, bleeding)	Derbyshire and Carey (2001); Rapp et al. (2005); Stirling and Morris (2006)
Distance to infection sources	Differently high concentrations of fungal spores in the air	Vasiliauskas et al. (2005); Green et al. (2006); Kasprzyk and Worek (2006); Augusta (2007)
Contact to infection sources	Differently intensive contact to infection sources, e.g. mycelium ¹⁾	Edlund (1998); Wakeling (2006); Augusta (2007)
Adverse moisture conditions	Mycelium growth may be limited due to low moisture content, whereas germination of spores is less affected by moisture	Morton and French (1966); Viitanen and Ritschkoff (1991); Viitanen (1997); Schmidt (2006)
UV light	Hindered spores germination due to lacking niches protected from degrading UV light; the formation of cracks can increase the protection of spores from UV	Panten et al. (1996); Schmidt (2006)

¹⁾accelerating effect

Once the initial inhibition was overcome, the rate of decay (cf. gradients in Figure 7.4-3a-e) of pine sapwood was similar between the different test sites and partly also between shade and sun exposures. The greenhouse exposure

was an exception; here decay was clearly accelerated compared to the other sites, which likely reflected the more favourable moisture and temperature conditions. Compared to open exposure in Hamburg the decay ratings were up to five times higher in the greenhouse after 2.3 years of exposure. This coincides with the acceleration of decay progress between greenhouse/tropical conditions and central European outdoor exposure found in soil bed tests by Polman et al. (1991) and in Lap-joint-tests by Wong et al. (2004). As expected, the differences diminished with proceeding exposure time due to the limited rating scale after EN 252 (1989).

Douglas fir tended to resist initiation of decay for far longer than pine sapwood, but once decay began, it generally proceeded more rapidly. However, due to very little decay of Douglas fir after six years exposure at some sites, it is still too early for a final comparison.

The nominal differences in decay development between different test sites and different exposures can be derived from the time needed to reach a certain mean decay rating (Table 7.4-3). In general, decay proceeded faster in the greenhouse (up to a factor of 2.4) and in the shade (up to a factor of 1.9) compared to the open field. Hereby, the influence of different test sites on the decay rate (up to a factor of 1.7) was similar to the influence of shade. However, with proceeding decay both differences diminished. This coincides with the findings of Augusta (2007) and Brischke et al. (2007b).

Table 7.4-3. Time to reach a given mean decay rating after CEN (1989) in horizontal double layers at various exposures.

Wood species	Test site	Time to mean decay rating [y]			
		1	2	3	4
Pine sapwood	Greenhouse winter	1.6	2.4	3.7	-
	Greenhouse	1.4	2.0	3.0	-
	Hamburg sun	3.3	4.6	5.4	-
	Hamburg shade	2.7	4.8	-	-
	Reulbach sun	3.7	4.7	-	-
	Reulbach Shade	3.3	4.6	6.0	-
	Stuttgart sun	3.6	5.7	-	-
	Stuttgart shade	1.9	4.1	5.3	-
	Freiburg sun	3.6	4.9	-	-
	Freiburg shade	2.2	4.6	6.1	-
Douglas fir heartwood	Greenhouse winter	5.0	-	-	-
	Greenhouse	-	-	-	-
	Hamburg sun	5.4	-	-	-
	Hamburg shade	5.7	-	-	-
	Reulbach sun	-	-	-	-
	Reulbach shade	-	-	-	-
	Stuttgart sun	-	-	-	-
	Stuttgart shade	4.7	5.5	6.1	-
	Freiburg sun	-	-	-	-
	Freiburg shade	4.4	5.2	-	-

Moisture conditions

As wood temperature and MC count to the key factors for fungal growth and wood decay (Viitanen 1997, Brischke et al. 2006), their quantity was determined and compared for the different test sites and exposures in the following. Table 7.4-4 gives an overview about the number of wet days above certain MCs (MC=20, 25, 30, 40, and 50%) and above 5 °C wood temperature, which can be seen as the lower limitation for fungal activity.

7.4 Wood moisture content and temperature in different micro-climates

Table 7.4-4. Days with an average air temperature above 5°C and a moisture content above 20, 25, 30, 40, or 50% for the different test sites and exposures (based on a total exposure interval of 1460 days*).

Wood species	Test site	Days with MC >				
		20%	25%	30%	40%	50%
Pine sapwood	Greenhouse winter	1449	1446	1412	1003	500
	Greenhouse	1452	1391	1299	963	363
	Hamburg sun	921	920	911	532	200
	Hamburg shade	933	921	908	900	543
	Reulbach sun	756	747	733	440	69
	Reulbach shade	788	788	778	666	19
	Stuttgart sun	846	822	791	576	83
	Stuttgart shade	906	894	879	780	160
	Freiburg sun	1006	1000	995	958	18
	Freiburg shade	998	995	980	878	207
Douglas fir heartwood	Greenhouse winter	1218	988	352	63	0
	Greenhouse	1257	689	17	0	0
	Hamburg sun	713	468	121	0	0
	Hamburg shade	806	625	252	2	0
	Reulbach sun	548	313	57	0	0
	Reulbach shade	707	492	123	0	0
	Stuttgart sun	637	486	216	0	0
	Stuttgart shade	871	759	436	0	0
	Freiburg sun	809	626	182	0	0
Freiburg shade	939	781	291	0	0	

*the measuring intervals were 01.01.2001-30.09.2003 and 01.10.2004-31.12.2005. The time interval in between was excluded due to technical difficulties.

Douglas fir heartwood was considerably dryer than pine sapwood at nearly all times of exposure. Therefore, the most distinctive differences between the sun and shade exposed test sets were found for the number of days above MC=30% for Douglas fir and above MC= 40% for pine sapwood. As the number of wet days (MC>40%) for pine was higher in the shade by a factor of 1.4 in Stuttgart, 1.5 in Hamburg and 1.7 in Reulbach, more wet days were found in the sun compared to the shade in Freiburg. The differences (days above MC=30%) between sun and shade for Douglas fir were stronger pronounced compared to pine sapwood: i.e. factors between 1.6 and 2.2.

The differences between the test sites were slightly stronger for the sun exposure (factors up to 2.2 for pine sapwood, and up to 3.8 for Douglas fir) than for the shade exposure (factors up to 1.4 for pine sapwood, and up to 3.6 for Douglas fir). The exposure of pine sapwood in a tropical greenhouse led to

extremely higher numbers of wet days for both Greenhouse and Greenhouse winter compared to the other exposures and coincides with remarkable higher decay rates.

Moisture courses are exemplarily shown for the test site in Stuttgart over a period of three years in Figure 7.4-4. In general, the MC of pine sapwood, especially during summer, was higher compared to Douglas fir. Furthermore, the MC of both wood species was higher in the shade exposed sets, especially during summer (Figure 7.4-4, mark 1), but also during winter (Figure 7.4-4, mark 2). This coincides with the generally higher number of wet days in the shade exposed test sets compared to the sun exposed sets (cf. Table 7.4-4) and indicates a higher moisture induced risk for decay due to reduced sunlight irradiation and hindered ventilation caused by the boxes. The amplitudes of the moisture course were higher for the sun exposed sets (Figure 7.4-4, mark 3). This might also have positively affected the conditions for fungal growth in the shade exposed sets, especially in the beginning of exposure.

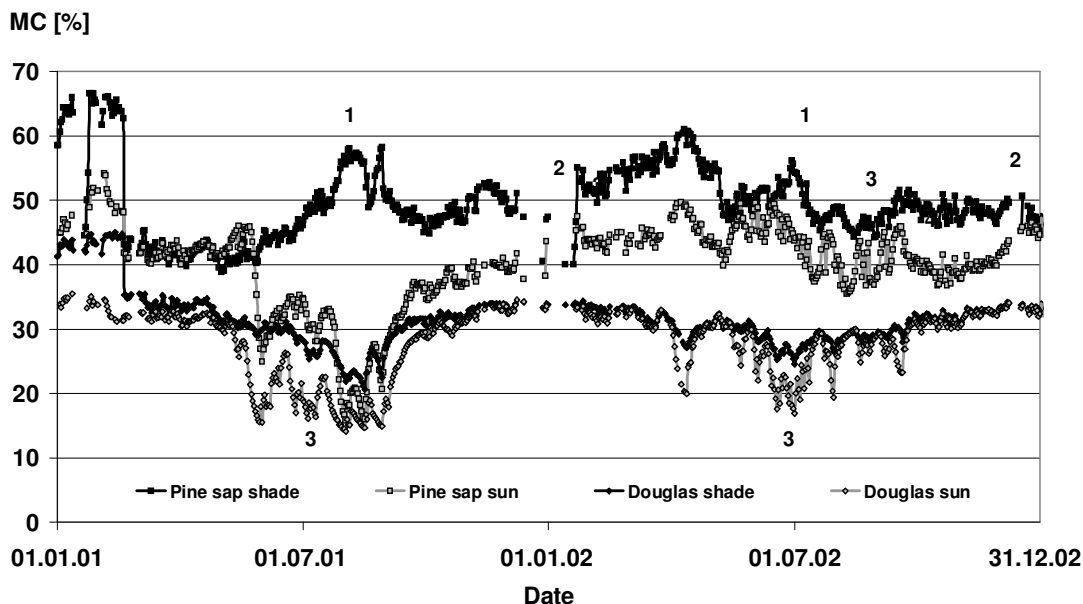


Figure 7.4-4. Courses of moisture content (MC) of pine sapwood and Douglas fir heartwood specimens, sun-exposed and shade-exposed in double-layer test sets in Stuttgart; days with a minimum air temperature below 0°C were not considered (Marks 1 to 3 indicate characteristics of the moisture course explained in the text).

Temperature conditions

The number of days above different temperatures and below the freezing point respectively are listed in Table 7.4-5. In general, the average temperature correlated well with the number of days above/below certain temperatures, e.g. Reulbach, the test site with the lowest average temperature, showed the highest number of days below 0°C and the lowest number of days above 20°C. However, when considering also the shade exposed test sets, differences in the number of warm or cold days can be observed between test sites with nearly the same average temperature, e.g. between Freiburg shade (10.8°C) and Hamburg sun (10.4°C), a difference of 51 days below the freezing point (i.e. factor 1.4) was found. The comparison between sun and shade exposed sets revealed that nearly all shade exposed sets experienced less cold days ($\leq 0^\circ\text{C}$) and less very hot days ($>25^\circ\text{C}$) than the sun exposed sets. Thus, the negative effect of extreme temperature days on fungal activity is mitigated in the shade. This coincides with higher decay activity in the shade sets at least at the beginning of exposure. However there was no direct correlation between temperature extremes and the degree of decay suggesting a more complex dose-response relationship between wood temperature, MC and decay rate.

Table 7.4-5. Days with a temperature (measured directly below the bottom layer) above 25, 20, 15, 10, or 5°C or below 0°C for the different test sites and exposures (based on a total exposure interval of 1460 days*).

Test site	Average temperature [°C]	Days with					
		> 25°C	> 20°C	> 15°C	> 10°C	> 5°C	< 0°C
Greenhouse winter	17.3	40	282	1118	1438	1460	0
Greenhouse	18.4	55	483	1185	1451	1460	0
Hamburg sun	10.4	32	191	476	743	1006	139
Hamburg shade	10.2	13	179	470	726	972	117
Reulbach sun	8.2	12	121	408	779	1119	344
Reulbach shade	8.2	8	130	425	739	1104	314
Stuttgart sun	9.7	22	210	552	884	1238	254
Stuttgart shade	9.1	2	135	500	822	1178	234
Freiburg sun	11.7	110	351	677	1007	1371	172
Freiburg shade	10.8	57	261	607	977	1313	190

*the measuring intervals were 01.01.2001-30.09.2003 and 01.10.2004-31.12.2005. The time interval in between was excluded due to technical difficulties.

Interactions between MC and wood temperature in different exposures

The differences between sun and shade exposure with respect to temperature conditions will be considered more detailed in the following. Therefore the results from 2-hourly readings of wood temperature are shown as an example for the Hamburg test site (Figure 7.4-5). Shade sets did not automatically have lower temperatures than sun-exposed sets (Figure 7.4-5). Wood temperature in the sun-exposed set declined to -8°C in the start of the winter, while the temperature did not fall below 0°C in the shade (Figure 7.4-5, mark 1). Temperature in the shade-exposed set did not decline below 0°C until it was colder or/and stayed cold for a longer period (Figure 7.4-5, mark 2). If once the wood in the shade is frozen (MC > fiber saturation provided), then it stays, whereby the temperature of the wood in the sun already exceeded 0°C (Figure 7.4-5, mark 3). This can be understood when considering the course of temperatures in spring 2002 (Figure 7.4-6).

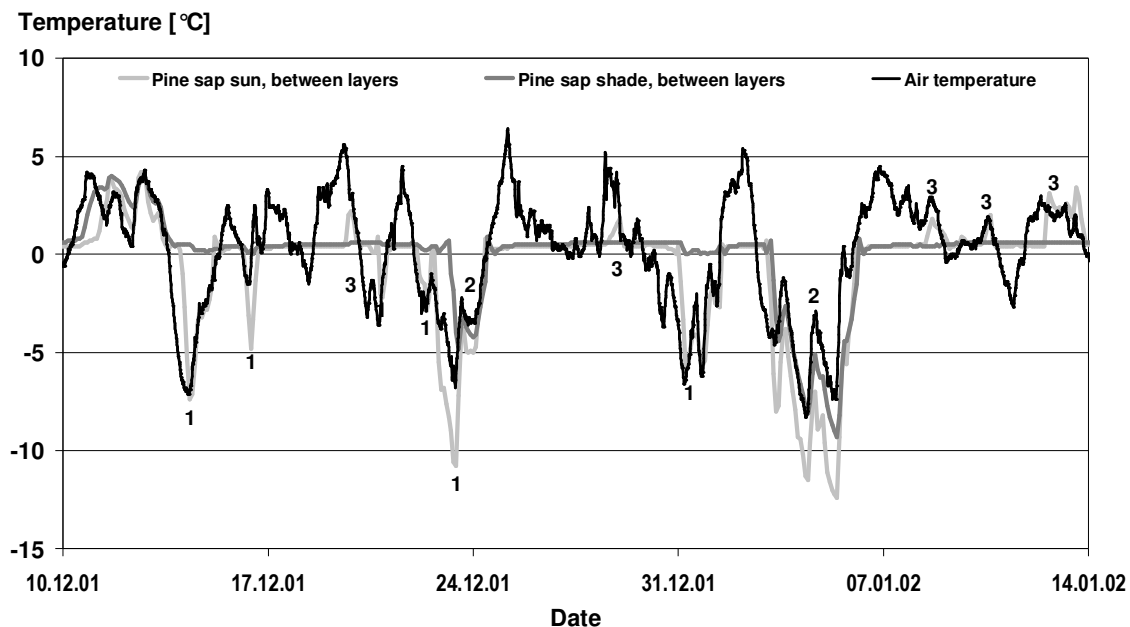


Figure 7.4-5. Course of temperature between pine sapwood layers (sun-exposed: light grey line; shade-exposed: dark grey line) of double-layer test sets and corresponding air temperature (black line) in Hamburg in winter 2001 (Marks 1 to 3 indicate characteristics of the temperature course explained in the text).

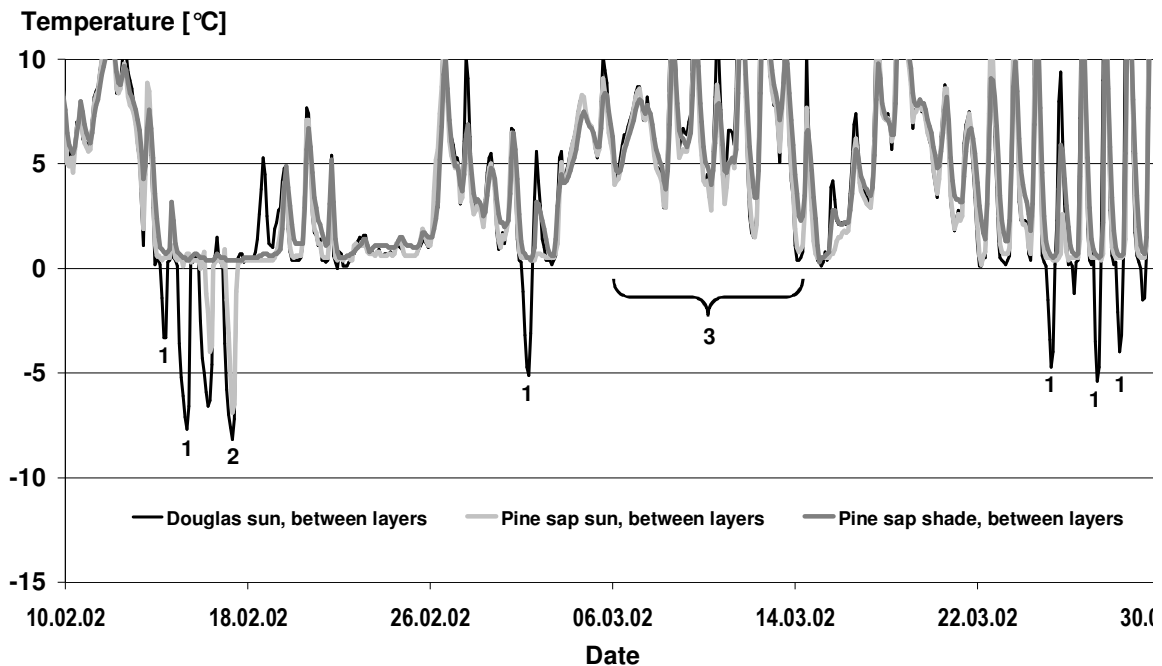


Figure 7.4-6. Course of temperature between pine sapwood layers (sun-exposed: light grey line; shade-exposed: dark grey line), and sun-exposed Douglas fir layers (black line) of double-layer test sets in Hamburg in spring 2002 (Marks 1 to 3 indicate characteristics of the temperature course explained in the text).

Temperatures in the driest wood specimens (Douglas fir heartwood) were below 0°C most often (Figure 7.4-6, mark 1). The temperature of the wetter pine sapwood specimens were below 0°C only once (Figure 7.4-6, mark 2), when the air temperature was very low for one week. The wettest specimens were the shade-exposed pine sapwood, which were never below 0°C during the whole spring of 2002 despite being exposed to many days of freezing temperatures. These differences can be explained by the thermal energy released while freezing and kept the wood temperature up. Per kg water to freeze 334 KJ are liberated, which prevent the wood from going below 0°C. Thus, the more water is in the wood, the higher is its temperature.

An additional effect occurs in cold, but not very cold nights during spring and autumn (e.g. Figure 7.4-6, mark 3). Although the air temperature is well above the freezing point, the shade-exposed pine sapwood still showed the smallest drop of temperature during cold nights, because the textile cover sheet kept the falling cold air away from the specimens.

The numerical results of nearly one year of 2-hourly recorded temperature between the layers of the double layer test sets in Hamburg (Table 7.4-4) can

be summarized as follows: the temperature amplitudes in the shade are much smaller than under open sky, which means the occurrence of less extremes in terms of less hot days and less cold nights. The driest wood specimens showed the tallest amplitudes referring to more hot days and more cold nights compared to specimens with higher moisture content.

Table 7.4-6. Numerical evaluation of 2-hourly recorded temperature between the layers of double layer test sets in Hamburg between 30.11.2001 and 09.10.2002. Total number of readings was 3760.

Temperature between upper and bottom layer	Number of readings		
	Douglas fir	Pine sap	
	Hamburg sun	Hamburg sun	Hamburg shade
> 35°C	122	79	4
> 30°C	258	203	56
> 25°C	421	366	246
< 0°C	182	109	50
< -5°C	79	49	20
< -10°C	11	10	0

7.4.4 Conclusions

It became obvious, that dealing with average weather data only is insufficient for estimating the decay hazard of a certain exposure site, or exposure situation, respectively. As shown for exposure in artificial shade, the omission of extreme conditions, such as very low or very high temperatures, led to a dampened amplitude of wood temperature and had presumably a positive effect on fungal activity. This underlines the essential meaning of direct decay influencing factors, such as MC and wood temperature, to be considered for service life prediction of wood.

Furthermore, it was shown, that the number of critical days (days above/below certain MC and temperature) seems to be a suitable measure to distinguish between differently severe exposure conditions. The integral of critical days in relation to corresponding decay assessments may therefore be useful to determine the dose, which impacts on a wooden component. However, the consideration of only one single parameter (in terms of critical days) will not lead to a useful correlation, as shown in this study. Thus, for a future set up of dose-response functions it is necessary to consider also potential interactions

between moisture and temperature, which will be presented in a follow-up publication.

7.4.5 References

- Arndt U, Willeitner H (1969) Zum Resistenzverhalten von Holz bei natürlicher Bewitterung. *Holz Roh Werkst* 27:179-188
- Augusta U (2007) Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Dissertation, University of Hamburg, Hamburg, Germany
- Augusta U, Rapp AO, Eckstein D (2004) Dauerhaftigkeit der wichtigsten heimischen Hölzer bei realitätsnaher Prüfung unter bautypischen Bedingungen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt G99-14 der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München
- Banerjee AK, Levy JF (1971) Fungal succession in wooden fence poles. *Material und Organismen* 6:1-25
- Behrendt CJ, Blanchette RA, Farrell RF (1995) An integrated approach, using biological and chemical control, to prevent blue stain in pine logs. *Canadian Journal of Botany* 73:613-619
- Boutelje JB, Hägglund G (1988) Permeability measurements on surface layers for detecting wood with abnormally high permeability. Document IRG/WP 2298. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Brischke C, Rapp AO (2005) Experimental approach for service life prediction of wooden materials. Document TT6-198. In: Proceedings of the 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 17–21 April 2005.
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R (2006) Decay influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering* 1:91-107
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R (2007a) Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay. Part 1: Long-term moisture recordings with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment*, submitted for publication.

- Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO, Augusta U (2007b) Dauerhaftigkeit heimischer Holzarten in verschiedenen Gebrauchsklassen & Feuchteschutz durch Hydrophobierung mit vegetabilen Ölen. In: Tagungsband zur 13. Quedlinburger Holzbautagung, Quedlinburg, Germany, 29-30 March 2007
- Carey JK (2002a) L-joint trials: Part 1: Observations on the process of colonisation and decay. Document IRG/WP 02-20250. International Research Group on Wood Protection, Stockholm.
- Carey JK (2002b) L-joint trials: Part 2: The relationship between colonisation by decay fungi and long-term performance. Document IRG/WP 02-20251. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Choi SM, Ruddick JNR, Morris PI (2003) Fungal colonization of CCA-treated decking. IRG/WP 03-10491. International Research Group on Wood Protection, Stockholm.
- Derbyshire H, Carey JK (2001) Evaluating joinery preservatives: Performance prediction using BS EN 330 L-joint-trials (IP2/01). Watford: BRE
- Dunleavy JA, McQuire AJ (1970) The effect of water storage on the cell-structure of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) with reference to its permeability and preservation. Journal of the Institute of Wood Science 26:20-28
- Eberhardt TL, Han JS, Micales JA, Young RA (1994) Decay resistance in conifer seed cones: Role of resin acids as inhibitors of decomposition by white rot fungi. Holzforschung 48:278-284
- Edlund M-L (1998) Durability of untreated wood exposed in terrestrial test fields and microcosms. Material und Organismen 32:253-275
- EN 252 (1989) Field test method for determining the relative protective effectiveness of wood preservatives in ground contact
- EN 335 (2006) Durability of wood and wood-based products – Definition of use classes
- EN/TS 12083 (2005) Durability of wood and wood-based products – Determination of natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods – Part 2: Soft rotting micro-fungi

- Findlay WPK (1966) Ecology of wood-destroying and wood-inhabiting fungi. In: Becker G, Liese W (eds) Holz und Organismen 1, Duncker & Humblot, Berlin, pp199-211
- Fojutowski A (2005) The influence of fungi causing blue-stain on absorptiveness of Scotch pine wood. Document IRG/WP 05-10565. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Greaves H (1970) The effect of selected bacteria and actinomycetes on the decay capacity of some wood-rotting fungi. Material und Organismen 5:265-279
- Greaves H (1972) Influence of a mixed microbial population on Basidiomycete decay. Material und Organismen 7:11-25
- Greaves H (1977) An illustrated comment on the soft rot problem in Australia and Papua New Guinea. Holzforschung 31:71-79
- Green BJ, Tovey ER, Sercombe JK, Blachere FM, Beezhold DH, Schmechel D (2006) Airborne fungal fragments and allergenicity. Medical Mycology 44:245-255
- Gref R, Håkansson C, Henningsson B, Hemming J (2001) Influence of wood extractives on brown and white rot decay in Scots pine heart-, light- and sapwood. Material und Organismen 33:119-128.
- Henningsson B (1967) Interactions between micro-organisms found in birch and aspen pulpwood. Studia Forstalia Suecica 53:1-31
- Jacquot C (1968) Antagonistic action of bacteria against fungi and its role in the preservation of pulpwood chips. B.W.P.A. Annual Convention, 1468:1-3
- Kasprzyk I, Worek M (2006) Airborne fungal spores in urban and rural environments in Poland. Aerobiologia 22:169-176
- Lee DH, Takahashi M, Tsunoda K (1992) Fungal detoxification of organoiodine wood preservatives. 1. Decomposition of the chemicals in shake cultures of wood-decaying fungi. Holzforschung 46:81-86
- Leicester RH, Wang C-H, Nguyen MN, Foliente GC (2005) Engineering models for biological attack on timber. Document TT4-217. In: Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France, 17–21 April 2005

- Morton HL, French DW (1966) Factors affecting germination of spores of wood-rotting fungi on wood. *Forest Products Journal* 16:25-30
- Panten H, Schnitzler J-P, Steinbrecher R (1996) Wirkung von Ultraviolettstrahlung auf Pflanzen. *Naturwissenschaftliche Rundschau* 49:343-346
- Polman JE, Michon SGL, Militz H (1991) Accelerated wood decay in a soil-bed test under greenhouse conditions compared with a stake test under field conditions. Document IRG/WP/2384. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Preston A, Walchewski P, Archer K, Zahora A, Jin L (2000) The ground proximity decay test method. IRG/WP 00-20205. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Rapp AO, Augusta U (2004) The full guideline for the "double layer test method" – A field test method for determining the durability of wood out of ground. Document IRG/WP 04-20290. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Rapp AO, Berninghausen C, Bollmus S, Brischke C, Frick T, Haas T, Sailer M, Welzbacher CR (2005) Hydrophobierung von Holz – Erfahrungen aus 7 Jahren Freilandtests. 24. Holzschutz-Tagung, Leipzig, Germany, 12-13 April 2005
- Rayner ADM, Boddy L (1988) Fungal decomposition of wood. Its biology and ecology. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore
- Rydell Å, Bergström M, Elowson T (2005) Mass loss and moisture dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) exposed outdoors above ground in Sweden. *Holzforschung* 59:183-189
- Rypáček V (1966) Biologie holzzerstörender Pilze. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena
- Schmidt EL, French DW (1979) Sterilisation method effects on germination of wood decay fungus spores observed by the contact agar method. *Phytopathology* 69:688-689
- Schmidt O (2006) Wood and tree fungi. Biology, damage, protection, and use. Springer, Berlin

- Schmidt O, Müller J (1996) Praxisversuche zum biologischen Schutz von Kiefernholz vor Schimmel und Schnittholzbläue. *Holzforschung und Holzverwertung* 48:81-84
- Stirling R, Morris PI (2006) The influence of extractives on western red cedar's equilibrium moisture content. Document IRG/WP 06-40331. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Vasiliauskas R, Lygis V, Larsson K-H, Stenlid J (2005) Airborne fungal colonisation of coarse woody debris in North-temperate *Picea abies* forest: impact of season and local spatial scale. *Mycological Research* 109:487-496
- Viitanen HA (1997) Modelling the time factor in the development of brown rot decay in pine and spruce sapwood – The effect of critical humidity and temperature conditions. *Holzforschung* 51:99-106
- Viitanen HA, Ritschkoff A-C (1991) Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report No. 222
- Wakeling RN (2006) Is field test data from 20 x 20 mm stakes reliable? Effects of decay hazard, decay type and preservative depletion hazard. Document IRG/WP 06-20327. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Wallace DF, Dickinson DJ (2004) 16S rRNA Analysis of the bacteria associated with biocide degradation. Document IRG/WP 04-10543. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Wong AHH, Morsing N, Henriksen KH, Ujang S (2004) Above ground microbial decay test of biocide treated and untreated wood exposed to Danish and humid tropical climates. Document IRG/WP 04-20306. International Research Group on Wood Protection, Stockholm

7.5 Publikation V: Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature, and fungal decay determined for 23 European field test sites

Wood Science and Technology. 2007, Submitted for publication.

by **Brischke, C.***, **Rapp A.O.**

Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for Wood Biology and Wood Protection, Leuschnerstr. 91, D-21031 Hamburg, Germany

*communicating author

Phone: +49-(0)40-73962-419

Fax: +49-(0)-73962-499

c.brischke@holz.uni-hamburg.de

Abstract

Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and Douglas fir heartwood (*Pseudotsuga menziesii* Franco) specimens were exposed in double layer field trials at 23 different European test sites under different exposure conditions (in total 27 test sets). The material climate in terms of wood moisture content (MC) and wood temperature was automatically monitored over a period of up to seven years and compared with the progress of decay. The overall aim of this study was to establish dose-response relationships between climate factors and decay as a basis for the service life prediction of wood. The "Scheffer Climate Index" based on weather data collected at official meteorological stations at the different test sites was poorly correlated with the corresponding decay progress and was therefore not a suitable tool for estimating site-specific decay potential. In contrast, the use of the combined material climatic parameters MC and wood temperature led to a feasible dose-response function and turned out to be a useful basis for service life prediction of wood.

7.5.1 Introduction

The service life of timber in outdoor applications is influenced by numerous factors, both wood-inherent properties and environmental factors. Site-specific climate has a major influence on wood decay and needs therefore to be considered for service life prediction of wooden components (Brischke and Rapp 2007). A number of different approaches have been taken to establish

climate based indices for estimating the site-specific decay potential (Scheffer 1971; Beesley et al. 1983; Creemers et al. 2002; Grinda and Carey 2004), but all failed to establish a sufficiently strong correlation between macro climatic data and decay that would allow them to be used for reliable service life prediction (De Groot 1982; Norén 2001; Brischke et al. 2007a).

The influence of macro- and microclimates on decay should be especially apparent with "wood moisture content" (MC) and "wood temperature" (Brischke and Rapp 2007). The overall aim of this study was therefore to establish dose-response functions for wood decay with wood MC and temperature. MC, wood temperature, and decay progress were monitored for up to seven years in above ground samples at 27 different exposure sites in Europe.

7.5.2 Material and methods

Field tests

Field test specimens cut from pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and Douglas fir heartwood (*Pseudotsuga menziesii* Franco) were monitored in terms of MC, wood temperature, and the progress of fungal decay up to a period of seven years. The specimens (500x50x25 mm³), according to EN 252 (1989), were exposed in double layer test rigs (Rapp and Augusta 2004) that consisted of specimens placed horizontally in two layers and exposed above ground producing a decay risk corresponding to European Hazard Class 3 (EN 335-1, 2006). The upper layer was displaced laterally by 25 mm with respect to the lower layer. The lower layer consisted of seven pine sapwood specimens and six Douglas fir specimens; the upper layer consisted of six pine sapwood stakes and five Douglas fir specimens. The specimens were supported at the cut ends by beams of CCB-impregnated pine sapwood, separated with bitumen foil from the preservative-treated supports. The whole test set-up formed a closed deck (73x65x21 cm³). To avoid the growth of grass it was placed on paved ground or horticultural foil.

The test rigs were exposed at 23 sites in Europe, which were selected to provide a range of climate regimes (one test rig at each site/for each exposure). Climate data at all sites were available from official weather stations, where

measurements of daily precipitation and average temperature were recorded. The characteristic data for the test sites are listed in (Table 7.5-1). Additionally, a second set of specimens at some sites was artificially shaded. "Shade sets" were put in plywood boxes (30x90x90 cm³) covered with fully water-permeable textile sheets, which were transmitting only 10% of the sunlight. At the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH) in Hamburg sets were exposed in a tropical greenhouse during the winter (Oct 15th – May 15th), and the whole year (Table 7.5-1). The exposure in shade boxes and the tropical greenhouse was carried out to provoke changes in terms of the microclimate and to promote the conditions for decay.

Table 7.5-1. Characteristic data of the exposure sites.

Test site and exposure	Country code	Height above sea level [m]	Average air temperature [°C]	Sum of precipitation [mm]	Begin of exposure	Last evaluation
Hamburg sun/shade	D	35	10.6 ¹⁾	874 ¹⁾	07/2000	04/2007
Greenhouse	D	35	21.6 ⁴⁾	6257 ³⁾	07/2000	04/2007
Greenhouse winter	D	35	18.6 ⁴⁾	4092 ^{3/4)}	07/2000	04/2007
Reulbach sun/shade	D	620	7.5 ²⁾	820 ¹⁾	07/2000	08/2006
Stuttgart sun/shade	D	459	9.9 ²⁾	741 ¹⁾	07/2000	08/2006
Freiburg sun/shade	D	302	12.1 ¹⁾	911 ¹⁾	07/2000	08/2006
Oberrottweil	D	221	11.7 ¹⁾	731 ¹⁾	12/2000	08/2006
Feldberg	D	1496	4.3 ⁴⁾	1588 ⁴⁾	12/2000	08/2006
Bühlertal	D	465	9.8 ⁵⁾	1664 ⁵⁾	12/2000	08/2006
Hornisgrinde	D	1131	6.0 ⁵⁾	2030 ⁵⁾	12/2000	08/2006
Hinterzarten	D	887	7.0 ⁵⁾	1586 ⁵⁾	12/2000	08/2006
Schömburg	D	635	8.0 ⁴⁾	954 ¹⁾	12/2000	10/2006
Heilbronn/Heidelberg ¹⁰⁾	D	173/111	11.2/11.7 ¹⁰⁾	769/679 ¹⁰⁾	12/2000	08/2006
Dobel	D	706	9.0 ⁹⁾	1473 ⁹⁾	12/2000	08/2006
St. Märgen	D	908	8.2 ¹⁾	1834 ¹⁾	12/2000	08/2006
Uppsala	S	7	6.8 ⁵⁾	579 ⁵⁾	05/2001	09/2006
Ljubljana	SLO	299	11.3 ¹⁾	1330 ¹⁾	04/2001	06/2006
Zagreb	HRO	123	10.7 ⁴⁾	910 ⁴⁾	08/2002	06/2006
London	GB	62	11.9 ⁸⁾	649 ⁸⁾	07/2002	09/2006
Garston	GB	90	10.7 ⁷⁾	515 ⁷⁾	07/2002	09/2006
Portsmouth	GB	1	11.6 ⁶⁾	667 ⁶⁾	04/2001	09/2006
Ghent	B	9	10.9 ¹⁾	758 ¹⁾	08/2002	11/2006
Bordeaux	F	4	14.0 ⁵⁾	798 ⁵⁾	01/2001	10/2006

¹⁾ average of 2000-2005

²⁾ average of 2001-2005

³⁾ equivalent to a spraying of 120l per week

⁴⁾ average of 2000-2004

⁵⁾ average of 2000-2006

⁶⁾ average of 2002-2006

⁷⁾ average of July 2002-June 2006

⁸⁾ average of 2002-2005

⁹⁾ average of 2000-2003

¹⁰⁾ site was changed in 10/2003 from Heilbronn to Heidelberg, average of 2000-2003, and 2004-2006 respectively

Decay assessment

The specimens were evaluated yearly by rating the extent and distribution of decay according to EN 252 (1989) as: 0 (sound), 1 (slight attack), 2 (moderate attack), 3 (severe attack), or 4 (failure). The prevailing type of decay was identified for each species and exposure according to EN 12083-2 (2005).

Automated recordings of wood moisture content (MC) and wood temperature

The MC of three pine sapwood and three Douglas fir heartwood samples in the bottom layer of each test set was recorded once a day. The measurement system applied in this study was described in an earlier publication (Brischke et al. 2007b) and can be summarized in brief as follows: electrodes of polyamide coated stainless steel cables were conductively glued in the specimens. The steel cables were connected to a small data logger (Materialfox Mini, Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Germany), that recorded the electrical resistance of the wood. The data logger were calibrated in a range between 12% and 50% MC (Brischke et al. 2007b). Measurements above fiber saturation were increasingly inaccurate, but still indicated a tendency within the calibration range. Average, minimum, and maximum temperature below the bottom layer of each test set were recorded daily using Thermofox Mini data logger (Scantronik Mugrauer GmbH, Zorneding, Germany).

Scheffer Climate Index

An index of the relative site potential to promote decay of off-the-ground wood structures was developed by Scheffer (1971). This Scheffer Climate Index, which is focused on air temperature and distribution of rainfall, is calculated as follows:

$$\text{Scheffer Climate Index} = \frac{\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dec}} [(T - 2)(D - 3)]}{16.7}$$

$\sum_{\text{Jan}}^{\text{Dec}}$ sum of the months January to December

T mean day-temperature of the month in °C

D mean number of days with more than 0.25 mm rain per month

In this study the Scheffer Climate Index was calculated monthly, then accumulated for each exposure interval and site. The data were compared with the corresponding decay ratings to assess potential relationships between climate and decay hazard.

7.5.3 Results and discussion

Relationship between time of exposure and decay

The progress of decay revealed high variation between the different exposure sites for both, pine sapwood (Figure 7.5-1) and Douglas fir heartwood (Figure 7.5-2). In Ljubljana decay was most rapid and pine sapwood specimens failed completely after 4 years of exposure. In contrast first decay was observed after 3.3 years at the Uppsala site, where decay was least rapid. Thus, obviously two effects lead to the variation in decay progress among the test sites. The time lags between exposure and the first detection of visible decay ranged from 0.4 years in Greenhouse winter to more than 3.8 years in Uppsala (Table 7.5-2). Numerous inhibitory effects on fungal activity, e.g. competition and antagonism between species, inhibitory extractives and insufficient permeability of the wood, potentially cause these time lags (Brischke and Rapp, 2007). The progress of decay, especially after the onset of visible decay, is presumably determined by temperature and MC inside the wood, and should therefore be seen as the main parameters for establishing a dose-response function. There maybe also interactions between the incipiently inhibition and the moisture/temperature induced dose.

Mean decay rating [0-4]

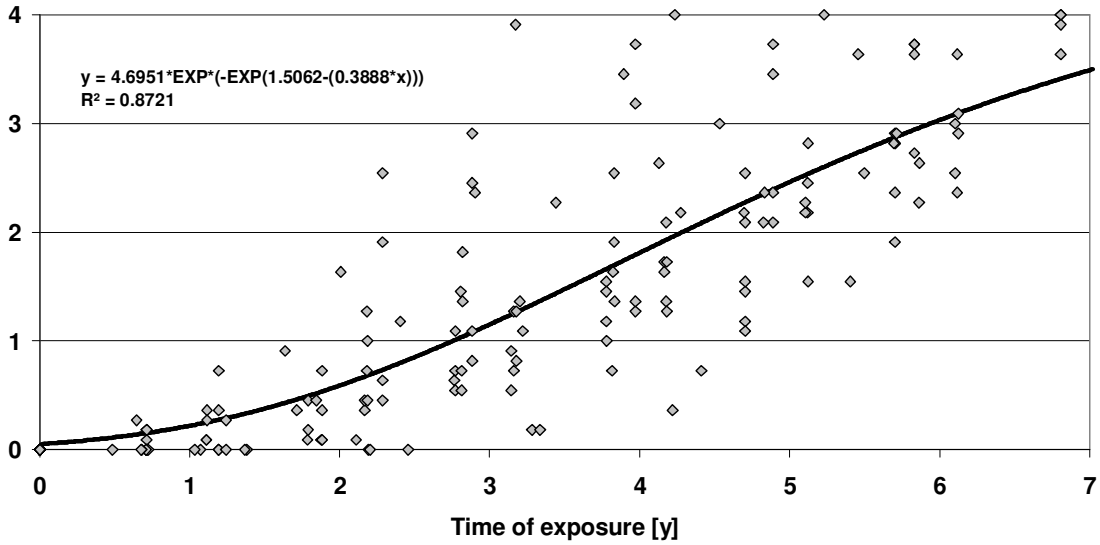


Figure 7.5-1. Relationship between the time of exposure and the mean decay rating according to EN 252 (1989) of Scots pine sapwood specimens exposed at 26 different exposure sites (each dot represents the mean decay rating at one exposure site at a certain time of exposure; black line: Gompertz smoothing function).

Mean decay rating [0-4]

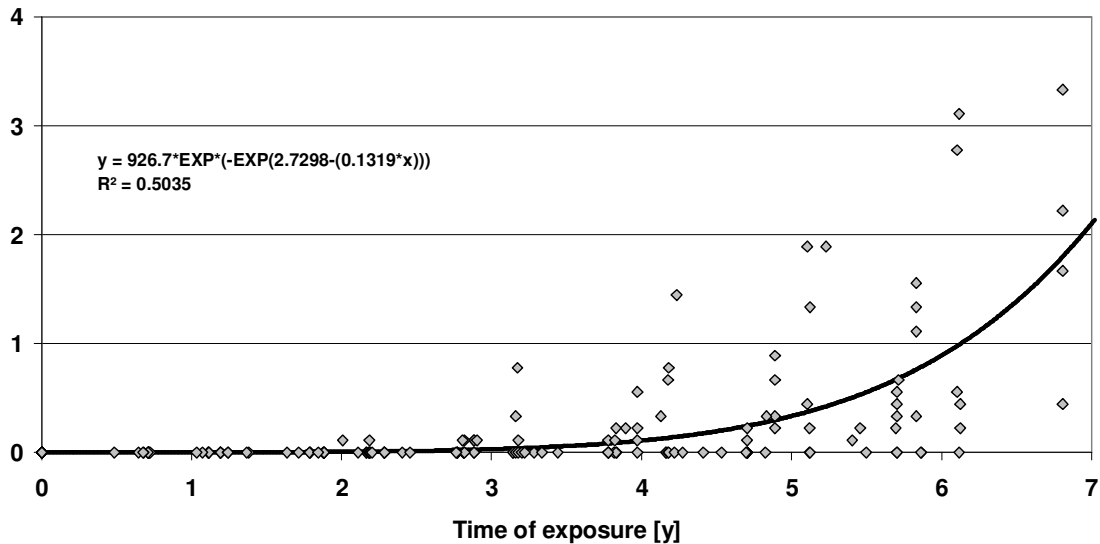


Figure 7.5-2. Relationship between the time of exposure and the mean decay rating according to EN 252 (1989) of Douglas fir heartwood specimens exposed at 26 different exposure sites (each dot represents the mean decay rating at one exposure site at a certain time of exposure; black line: Gompertz smoothing function).

Table 7.5-2. Mean time lag (exposure time before first incidence of decay) for Scots pine sapwood and Douglas fir heartwood at the different exposure sites.

Test site and exposure	Mean time lag	
	Pine sapwood [y]	Douglas fir heartwood [y]
Hamburg sun	2.2	4.3
Hamburg shade	1.7	4.8
Greenhouse	0.9	> 4.7
Greenhouse winter	0.4	> 6.2
Reulbach sun	2.1	> 5.6
Reulbach shade	1.7	> 5.6
Stuttgart sun	1.8	> 6.1
Stuttgart shade	1.2	4.3
Freiburg sun	1.6	> 5.2
Freiburg shade	0.8	> 3.8
Oberrottweil	2.4	> 5.6
Feldberg	1.9	> 5.7
Bühlertal	1.2	> 4.7
Hornisgrinde	1.9	> 5.7
Hinterzarten	1.7	> 5.2
Schömberg	2.2	> 5.9
Heilbronn/Heidelberg	1.5	> 5.0
Dobel	2.5	> 5.9
St. Märgen	1.7	> 5.3
Uppsala	> 3.8	> 5.3
Ljubljana	1.3	> 3.6
Zagreb	1.5	> 3.6
London	> 3.7	> 4.2
Garston	2.1	> 3.9
Portsmouth	0.7	> 5.3
Ghent	2.4	> 4.3
Bordeaux	n.a.	n.a.

n.a. = not available

Relationship between Scheffer Climate Index and decay

The Scheffer Climate Index was calculated monthly for the different test sites and correlated with the corresponding mean decay ratings for pine sapwood exemplarily (Figure 7.5-3). The relationship between the climate index (regarded as dose) and the decay rating (regarded as response) on pine sapwood varied widely among test sites. The inaccuracy of the Scheffer Climate Index was earlier pointed out by De Groot (1982), Norén (2001) and others: additional factors, as mesoclimatic and microclimatic differences among others, are not considered. This coincides with the findings of this study and was especially apparent for the exposure under greenhouse conditions. The Scheffer Climate Index in these exposures was very high due to daily precipitation and constantly high temperatures, whereas the response in terms of decay was comparatively low.

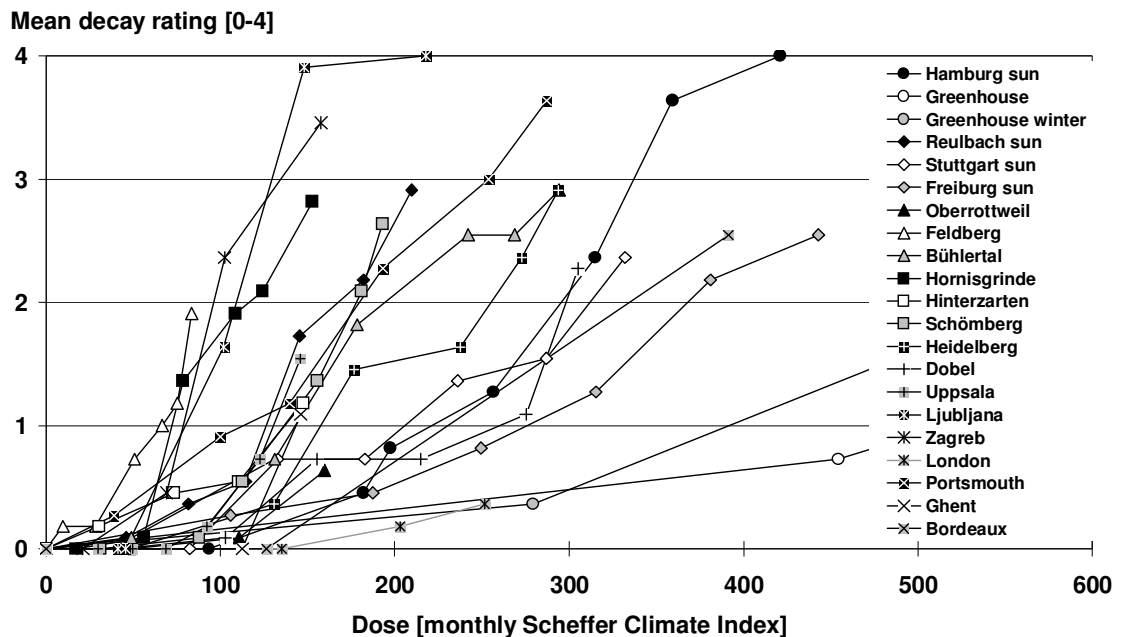


Figure 7.5-3. Relationship between the monthly Scheffer Climate Index and the mean decay rating according to EN 252 (1989) of Scots pine sapwood specimens for different exposure sites.

Even when decay was related to the conditions prevailing during the exposure period, rather than to long-term averages, as recommended by Beesley et al. (1983) and conducted in the present study, no sufficient correlation was obtained. To consider air temperature and rainfall, which both have only an indirect influence on decay, seems to be an oversimplified approach. Therefore the direct decay factors MC and wood temperature were used to establish dose-response functions.

Set up of MC and wood temperature based dose-response functions

The average daily wood temperature and MC were used to estimate the daily dose in terms of a decay hazard. The total daily dose (d), which impacts on the wood, was therefore assumed to be the product of a moisture induced component d_{MC} and a temperature induced component d_T as follows:

$$d = d_{MC} \cdot d_T$$

Starting from literature data, the cardinal points of both parameters, wood temperature and MC, for fungal growth and decay activity were sought and used to set up polynomial base functions for both dose components (cf. Figure 7.5-4).

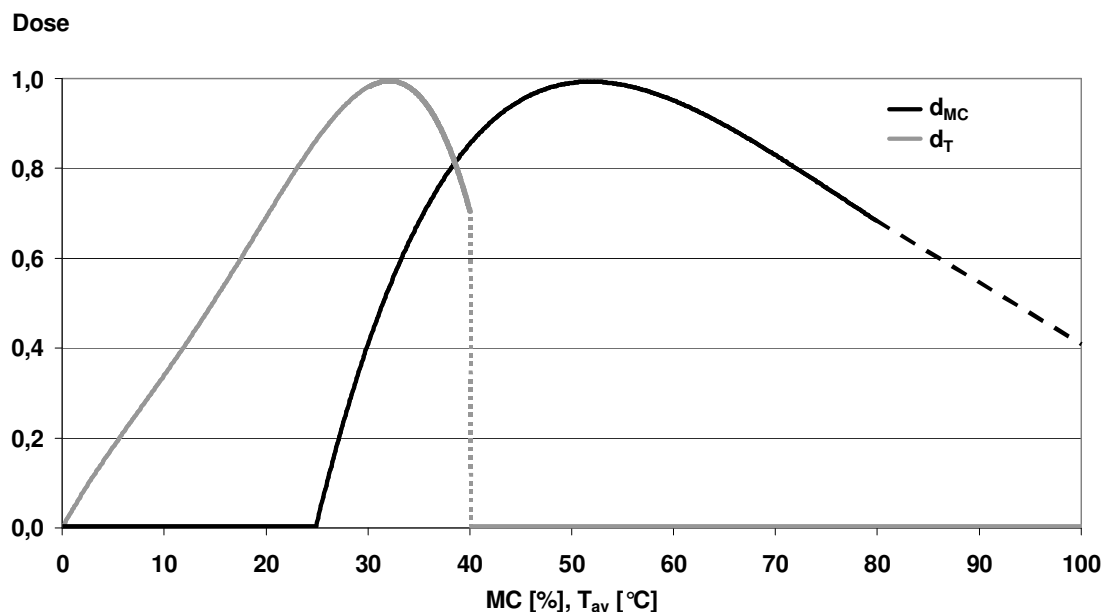


Figure 7.5-4. Relationship between MC and daily moisture induced dose d_{MC} , and between average wood temperature T_{av} and daily temperature induced dose d_T respectively. Dashed black line: MC > 80% did not occur, therefore the curve progression is uncertain.

Because of the diversity of fungal species potentially occurring in the field, cardinal ranges can be found, rather than exact cardinal points for MC and temperature. The minimum MC for fungal decay needs to be above fiber saturation (Schmidt 2006), otherwise the enzymes released by the fungus that are responsible for the decomposition of the cell-wall components, will not be transported and are therefore inactive. Thus the moisture minimum for fungal growth is around 26 to 30%, whereas the optimum of many relevant basidiomycetes ranges between 35% and 70% (Ammer 1964; Rypáček 1966; Viitanen and Ritschkoff 1991; Huckfeldt et al. 2005). The upper moisture limit for most basidiomycetes is 90% MC (Bavendamm 1974), although some fungi have higher moisture maxima, e.g. *Gloeophyllum abietinum*, different blue stain fungi, and red-streakiness causing fungi (Ammer 1963; Schuhmacher and Schulz 1992; Schmidt 2006).

In general, the minimum temperature for fungal growth is 0 °C, because no liquid water is available in hyphae, provided that the freezing point is not lowered by a modified chemical composition of the hyphae or the wood (Jennings and Lysek 1999). The optimum temperatures for fungal activity are strongly dependent on the species, but range frequently between 20 and 40 °C (e.g. Wälchli 1977; Schmidt 2006). The optimum for fungal decay however can be different, i.e. lower, from the optimum for fungal growth (Grinda 1975). The maximum for mycelial growth and wood decay by most wood fungi is often 40 to 50 °C (Rypáček 1966; Viitanen and Ritschkoff 1991; Schmidt 2006).

The mean values of the cardinal points as described above were used to formulate a base function for both dose components. Minima and maxima were set as dose=0, the optima as dose=1. Furthermore an approximately linear course progression was assumed, with respect to the "reaction speed-temperature rule" between minimum and maximum temperature (Schmidt 2006), whereby enzyme activity is increased by two to four times with each 10 °C increase in temperature.

The daily dose was accumulated and correlated with the corresponding decay ratings for the different exposure intervals and test sites. The sigmoid course of the dose-response relationship was fitted with a Gompertz-function, which was computed by NLIN in the SAS[®] package (cf. Figure 7.5-5). Based on the method of least squares for the dose-response function, all variables of the daily dose functions (d_{MC} and d_T) were optimized using MS Excel Solver. The following side conditions were considered: the total daily dose of days with a maximum temperature above 40 °C, with a minimum temperature below -1 °C, or with a MC below 25% was set as 0.

Mean decay rating [0-4]

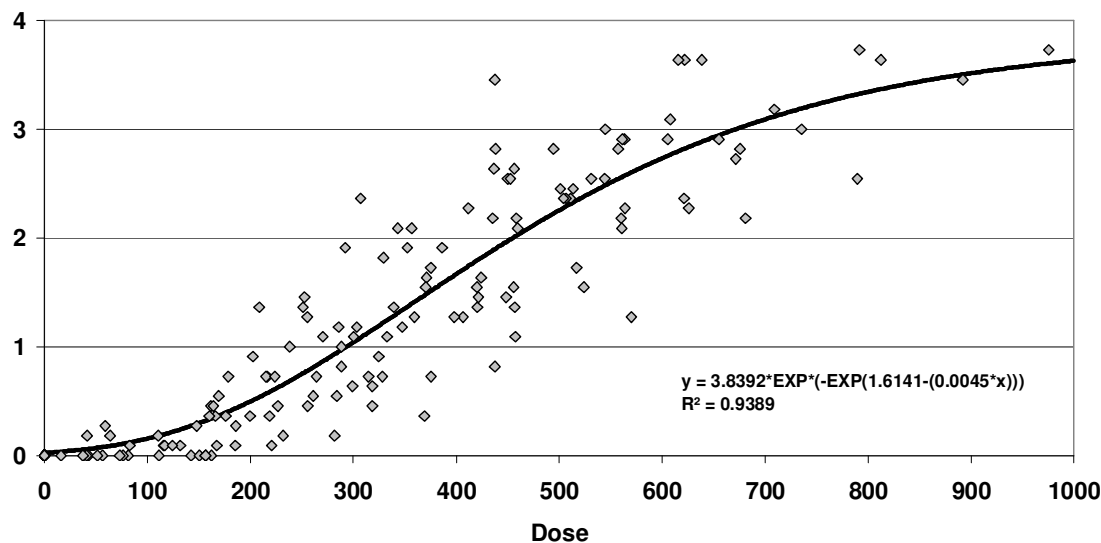


Figure 7.5-5. Relationship between the dose and the mean decay rating according to EN 252 (1989) of Scots pine sapwood specimens exposed at 26 different field test sites (each dot represents the mean decay rating at one exposure site at a certain time of exposure; black line: Gompertz smoothing function).

The computed optimization revealed the following fifth-degree polynomial for the MC induced, and a fourth-degree polynomial for the temperature induced daily dose, as shown in Figure 7.5-4:

$$d_{MC} = 6.75 \cdot 10^{-10} MC^5 - 3.50 \cdot 10^{-7} MC^4 + 7.18 \cdot 10^{-5} MC^3 - 7.22 \cdot 10^{-3} MC^2 + 0.34 MC - 4.98$$

; if $MC \geq 25\%$

$$d_T = 1.8 \cdot 10^{-6} T^4 + 9.57 \cdot 10^{-5} T^3 - 1.55 \cdot 10^{-3} T^2 + 4.17 \cdot 10^{-2} T$$

; if $T_{min} > -1 \text{ } ^\circ\text{C}$ and $T_{max} < 40 \text{ } ^\circ\text{C}$

d_{MC} = MC induced daily dose

d_T = temperature induced daily dose

MC = daily moisture content

T = daily average wood temperature

T_{min} = daily minimum temperature

T_{max} = daily maximum temperature

Since brown rot fungi generally have lower moisture minima and optima than white and soft rot fungi (e.g. Viitanen 1997; Schmidt 2006), it seems reasonable to consider them separately to establish dose-response functions. For the time being there are data on brown rot decay from one test site (Ljubljana) only, whereas white rot and soft rot were predominant on pine sapwood at 26

exposure sites and therefore a dose-response function was set up for this combination (Figure 7.5-5). The MC and temperature induced dose correlated well with fungal decay as response ($R^2=0.9389$).

In general, two different wood species may respond differently in terms of moisture content under the same climate conditions. The MC of pine sapwood in the double layer set up, was critically above fibre saturation at nearly all times. In contrast, Douglas fir was much drier and was well below fibre saturation during the summer periods. Consequently, it is insufficient to determine the dose for decay from microclimatic data only, because the substrate wood needs to be considered in terms of its adsorption and desorption properties, which are again determined by its accessory ingredients or its anatomical structure (e.g. EN 335-2, 2006; Rapp et al. 2000; Stirling and Morris 2006). Thus, a direct relationship can only be found between the material climate (long term MC and wood temperature) and decay.

Future work

Further improvements of the existing dose-response functions are conceivable and should be considered for future modeling:

- The dominating decay type has probably a significant influence on the progress of decay. Therefore the data base needs to be extended, because in this study only one test site revealed brown rot as dominating rot type on pine sapwood. In addition, a sufficient data base in terms of decay ratings for Douglas fir heartwood can be expected within the next two years.
- A potential time dependence of the dose-response relationship may be caused by the occurrence of different cardinal temperature and MC points for different stages of fungal infestation, e.g. germinating spores and mycelium (Morton and French 1966; Schmidt 2006).
- Different disturbance variables, e.g. longer periods of dryness or frost, may affect the progress of decay and could be regarded by weighting intervals of very high or very low decay potential.

- Exposure in the subtropics and tropics should be addressed, as such climates were so far only considered by means of exposure in a greenhouse.

Coming from applied service life prediction and planning the focus is certainly more on the practicability of the prediction tool, especially on the availability of the data needed. In this regard the use of easily available climate data is desirable, because it is difficult to receive MC and wood temperature data for a particular site. Furthermore, the relation between climate data (precipitation, air temperature) and the material climate strongly depends on the type of exposure (e.g. vertical/horizontal, with/without water traps, covered/non-covered), and therefore more information is needed about the relationship between MC and the amount and duration of rainfall under different exposure situations.

7.5.4 Conclusions

Great differences in decay progress and thus in the expected service life of wood in above ground exposure were observed between different test sites in Europe and seemed to be strongly influenced by the local climate. However, no direct relationship could be established between climatic characteristics in terms of precipitation and temperature and decay. On the other hand, the combined material climatic parameters MC and wood temperature were strongly correlated with decay and a feasible dose-response function that was reliable for white and soft rot on pine sapwood was established. Future studies will show, whether the decay type brown rot is also covered with the function or an adjustment of the function is needed.

In addition to the influence of different rot types, future work is needed with respect to other wood species, different exposure situations, and especially to the relationship between climate data (precipitation, air temperature) and wood moisture content and may further enhance the applicability of the method.

7.5.5 References

Ammer U (1963) Untersuchungen über das Wachstum von Rotstreifepilzen in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Forstwissenschaftliches Centralblatt 82:360-391

- Ammer U (1964) Über den Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit und Holzerstörung durch Pilze. Holz Roh Werkst 22:47-51
- Bavendamm W (1974) Die Holzschäden und ihre Verhütung. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart
- Beesley J, Creffield JW, Saunders IW (1983) An Australian test for decay in painted timbers exposed to the weather. Forest Products Journal 33:57-63
- Brischke C, Rapp AO (2007) Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field – Observations in different micro-climates. Wood Sci Technol, submitted for publication.
- Brischke C, Bayerbach R, Rapp AO (2007a) Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. Wood Material Science and Engineering 1:91-107
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R (2007b) Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. Building and Environment, submitted for publication
- Creemers J, de Meijer M, Zimmermann T, Sell J (2002) Influence of climatic factors on the weathering of coated wood. Holz Roh Werkst 60:411-420
- De Groot RC (1982) An assessment of climate index in predicting wood decay in houses. Durability of Building Materials 1:169-174
- EN 252 (1989) Field test method for determining the relative protective effectiveness of wood preservatives in ground contact
- EN 335-1 (2006) Durability of wood and wood-based products – Definition of use classes – Part 1: General
- EN 335-2 (2006) Durability of wood and wood-based products – Definition of use classes – Part 2: Application to solid wood
- EN/TS 12083 (2005) Durability of wood and wood-based products – Determination of natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods – Part 2: Soft rotting micro-fungi
- Grinda M (1975) Abhängigkeit des Holzabbaues durch Basidiomyceten von der Temperatur. In: Becker G, Liese W (eds) Organismen und Holz 3, Duncker & Humblot, Berlin, pp 187-196

- Grinda M, Carey J (2004) The COST Euro Index for fungal decay – Five years results. In: Proceedings of Cost E22 Final Workshop, Estoril, Portugal, 22-23 March 2004
- Huckfeldt T, Schmidt O, Quader H (2005) Ökologische Untersuchungen am Echten Hausschwamm und weiteren Holzfäulepilzen. Holz Roh Werkst 63:209-219
- Jennings DH, Lysek G (1999) Fungal biology. Bios, Oxford
- Morton HL, French DW (1966) Factors affecting germination of spores of wood-rotting fungi on wood. Forest Products Journal 16:25-30
- Norén J (2001) Assessment and mapping of environmental degradation factors in outdoor applications. Dissertation, KTH, Stockholm, Sweden
- Rapp AO, Augusta U (2004) The full guideline for the "double layer test method" – A field test method for determining the durability of wood out of ground. Document IRG/WP 04-20290. International Research Group on Wood Protection, Stockholm
- Rapp AO, Peek R-D, Sailer M (2000) Modelling the moisture induced risk of decay for treated and untreated wood above ground. Holzforschung 54:111-118
- Rypáček V (1966) Biologie holzzerstörender Pilze. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena
- Scheffer TC (1971) A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. Forest Products Journal 21:25-31
- Schmidt O (2006) Wood and tree fungi. Biology, damage, protection, and use. Springer, Berlin.
- Schuhmacher P, Schulz H (1992) Untersuchungen über das zunehmende Auftreten von Innenbläue an Kiefern-Schnittholz. Holz Roh Werkst 50:125-134
- Stirling R, Morris PI (2006) The influence of extractives on western red cedar's equilibrium moisture content. Document IRG/WP 06-40331. International Research Group on Wood Protection, Stockholm.
- Viitanen HA (1997) Modelling the time factor in the development of brown rot decay in pine and spruce sapwood – The effect of critical humidity and temperature conditions. Holzforschung 51:99-106

- Viitanen HA, Ritschkoff A-C (1991) Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report No. 222.
- Wälchli O (1977) Der Temperatureinfluss auf die Holzerstörung durch Pilze. Holz Roh Werkst 35:45-51

7.6 Publikation VI: External and internal fungal flora of pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) specimens in above-ground field tests at six different sites in south-west Germany

Holzforschung, Vol. 61, pp. 104–111, 2007 • Copyright © by Walter de Gruyter • Berlin • New York. DOI 10.1515/HF.2007.017

Holzforschung, Vol. 61, pp. 104–111, 2007 • Copyright © by Walter de Gruyter • Berlin • New York. DOI 10.1515/HF.2007.017

External and internal fungal flora of pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) specimens in above-ground field tests at six different sites in south-west Germany

Ulrika Råberg^{1*}, Christian Brischke², Andreas O. Rapp², Nils O.S. Högberg³ and Carl Johan Land¹

¹ Department of Wood Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

² Institute for Wood Biology and Wood Protection, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, BFH, Hamburg, Germany

³ Department of Forest Mycology and Pathology, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

*Corresponding author.

Department of Wood Science, P.O. Box 7008, Swedish University of Agricultural Sciences, SE-750 07 Uppsala, Sweden
E-mail: ulrika.raberg@trv.slu.se

Abstract

The occurrence of fungal species on pine sapwood samples obtained from an above-ground field test study was analysed by terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP), cloning, and sequencing. Samples were taken from eight double-layer set-ups that were exposed to the environment at six different locations in south-west Germany. The occurrence of fungal species was correlated with decay intensity and rot types on one hand, and characteristics of the test sites, such as precipitation, average temperature and height above sea level on the other hand. In total, 62 different fungal species were found based on T-RFLP, cloning and sequencing. Of the 39 species that were found four or more times, 30 were ascomycetes, five were basidiomycetes, and four could not be classified. The most common fungus found in this study was *Coniochaeta ligniaria* ((Grev.) Cooke), a soft rot fungus that occurred in 87 of 152 samples (57%). No single factor at the test sites seemed to be decisive for the abundance of fungal species or decay intensity. Within the first years of this study, soft rot fungi was found more frequently in pine sapwood specimens than basidiomycetes.

Keywords: decay; double layer; fungi; sequencing; service life prediction; soft rot; T-RFLP.

Introduction

Resistance against wood-destroying organisms is an inherent property that directly influences the service life of wood and wood-based products. The natural durability of wood depends on the species, extractives content,

water permeability, and many other factors. Furthermore, the durability can be improved by chemical preservation and modification. In Europe, numerous laboratory and field tests are standardised to determine the protective effectiveness of wood preservatives (CEN 1989, 1993, 1996, 1997). However, the durability of wood, which determines service life, means resistance to wood-destroying organisms under actual environmental conditions. It is therefore essential to consider environmental factors in predicting the service life of wood (Brischke and Rapp 2005), such as moisture content, wood temperature, accessible nutrients and the type of wood-decaying fungi. The presence of fungal spores in the air is ubiquitous, but the frequency and number of spores varies among different sampling sites. The influence of fungal species and their inoculum potential on the decay rate and service life of wood is unclear. Carey (2002a,b), for example, found only a poor correlation between decay fungi on wood specimens and the onset of decay (detected visually) in different L-joint trials in the UK.

Studies on the occurrence of fungal species in wood are useful for detecting fungi and differences in the inoculum potential at different geographical sites. Promising approaches and modern techniques already exist. Molecular techniques allow studies of fungal communities on and within wood specimens in a new way (Jasalavich et al. 2000; Schmidt 2000; Schmidt and Moreth 2000; Jellison et al. 2003; Råberg et al. 2005). These techniques are straightforward and rapid, as complicated cultivation steps can be omitted (Råberg et al. 2005; Schmidt 2006). Moreover, the risk of cultivating a contaminating fungal spore is avoided, as well as the risk that slow-growing mycelium will be overgrown by more rapidly developing mycelia. Samples from field trials or objects taken out of service can be screened for a specific species or a range of fungal species. In wood science, the traditional target is to search for rot fungi. A rot fungus may be a brown-, white- or soft-rot fungus. Rot fungi degrade wood and cause severe strength loss. Staining fungi, which do not degrade wood or cause strength loss, are nevertheless a major concern in wood science because of the discoloration accompanying the rot (Eaton and Hale 1993). Several studies have applied DNA-based approaches to identify fungi that degrade construction wood (Jasalavich et al. 2000; Moreth and Schmidt 2000; Schmidt 2000; Schmidt and Moreth 2000, 2003; Adair et al. 2002; Schmidt et al. 2002; Jellison et al. 2003; Diehl et al. 2004; Högberg and Land 2004; Ray et al. 2004; Råberg et al. 2004), but few studies considered field samples without culturing fungi on a medium before analysis (Jasalavich et al. 2000; Adair et al. 2002; Jellison et al. 2003; Högberg and Land 2004; Råberg et al. 2004).

Ulrika Råberg^{1*}, Christian Brischke², Andreas O. Rapp², Nils O.S. Högberg³, Carl Johan Land¹

¹ Department of Wood Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

² Institute for Wood Biology and Wood protection, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, BFH, Hamburg, Germany

³ Department of Forest Mycology and Pathology, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

*Corresponding author

Department of Wood Science, P.O. Box 7008, Swedish University of Agricultural Sciences, SE-750 07 Uppsala, Sweden

E-mail: ulrika.raberg@trv.slu.se

Abstract

The occurrence of fungal species on pine sapwood samples obtained from an above-ground field test study was analysed by terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP), cloning, and sequencing. Samples were taken from eight double-layer set-ups that were exposed to the environment at six different locations in south-west Germany. The occurrence of fungal species was correlated with decay intensity and rot types on one hand, and characteristics of the test sites, such as precipitation, average temperature and height above sea level on the other hand. In total, 62 different fungal species were found based on T-RFLP, cloning and sequencing. Of the 39 species that were found four or more times, 30 were ascomycetes, five were basidiomycetes, and four could not be classified. The most common fungus found in this study was *Coniochaeta ligniaria* ((Grev.) Cooke), a soft rot fungus that occurred in 87 of 152 samples (57%). No single factor at the test sites seemed to be decisive for the abundance of fungal species or decay intensity. Within the first years of this study, soft rot fungi was found more frequently in pine sapwood specimens than basidiomycetes.

Keywords: decay; double layer; fungi; sequencing; service life prediction; soft rot; T-RFLP.

7.6.1 Introduction

Resistance against wood-destroying organisms is an inherent property that directly influences the service life of wood and wood-based products. The natural durability of wood depends on the species, extractives content, water permeability, and many other factors. Furthermore, the durability can be improved by chemical preservation and modification. In Europe, numerous laboratory and field tests are standardised to determine the protective effectiveness of wood preservatives (CEN 1989, 1993, 1996, 1997). However, the durability of wood, which determines service life, means resistance to wood-destroying organisms under actual environmental conditions. It is therefore essential to consider environmental factors in predicting the service life of wood (Brischke and Rapp 2005), such as moisture content, wood temperature, accessible nutrients and the type of wood-decaying fungi. The presence of fungal spores in the air is ubiquitous, but the frequency and number of spores varies among different sampling sites. The influence of fungal species and their inoculum potential on the decay rate and service life of wood is unclear. Carey (2002a,b), for example, found only a poor correlation between decay fungi on wood specimens and the onset of decay (detected visually) in different L-joint trials in the UK.

Studies on the occurrence of fungal species in wood are useful for detecting fungi and differences in the inoculum potential at different geographical sites. Promising approaches and modern techniques already exist. Molecular techniques allow studies of fungal communities on and within wood specimens in a new way (Jasalavich *et al.* 2000; Schmidt 2000; Schmidt and Moreth 2000; Jellison *et al.* 2003; Råberg *et al.* 2005). These techniques are straightforward and rapid, as complicated cultivation steps can be omitted (Råberg *et al.* 2005; Schmidt 2006). Moreover, the risk of cultivating a contaminating fungal spore is avoided, as well as the risk that slow-growing mycelium will be overgrown by more rapidly developing mycelia. Samples from field trials or objects taken out of service can be screened for a specific species or a range of fungal species.

In wood science, the traditional target is to search for rot fungi. A rot fungus may be a brown-, white- or soft-rot fungus. Rot fungi degrade wood and cause severe strength loss. Staining fungi, which do not degrade wood or cause strength loss, are nevertheless a major concern in wood science because of the discoloration accompanying the rot (Eaton and Hale 1993). Several studies have applied DNA-based approaches to identify fungi that degrade construction wood (Jasalavich *et al.* 2000; Moreth and Schmidt 2000; Schmidt 2000; Schmidt and Moreth 2000, 2003; Adair *et al.* 2002; Schmidt *et al.* 2002; Jellison *et al.* 2003; Diehl *et al.* 2004; Högberg and Land 2004; Ray *et al.* 2004; Råberg *et al.* 2004), but few studies considered field samples without culturing fungi on a medium before analysis (Jasalavich *et al.* 2000; Adair *et al.* 2002; Jellison *et al.* 2003; Högberg and Land 2004; Råberg *et al.* 2004).

The objective of this study was to identify the community of fungal species on and within pine sapwood specimens taken from woods exposed to above-ground conditions at different sites. The decay intensity and types of decay should be correlated with geographic and climatic parameters of the site, such as height above sea level, amount of precipitation and temperature.

7.6.2 Materials and methods

Field test

Samples were taken from pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) specimens placed in double-layer test devices (Rapp and Augusta 2004) in 2000. The double-layer tests (Figure 7.6-1) consisted of specimens (500x50x25 mm³) according to CEN (1989) placed horizontally in two layers and exposed to ground contact according European Hazard Class 3 (CEN 1992). The upper layer was shifted laterally by 25 mm (half a stake width) to the lower layer. The lower layer consisted of seven pine sapwood specimens and six Douglas fir specimens; the upper layer consisted of six pine sapwood stakes and five Douglas fir specimens. The specimens were supported at the cut ends by beams of CCB-impregnated pine sapwood, separated with bitumen foil from the preservative-treated supports. The whole test set-up forms a closed deck (73x65x21 cm³) placed on paved ground or horticultural foliage to avoid the growth of grass.

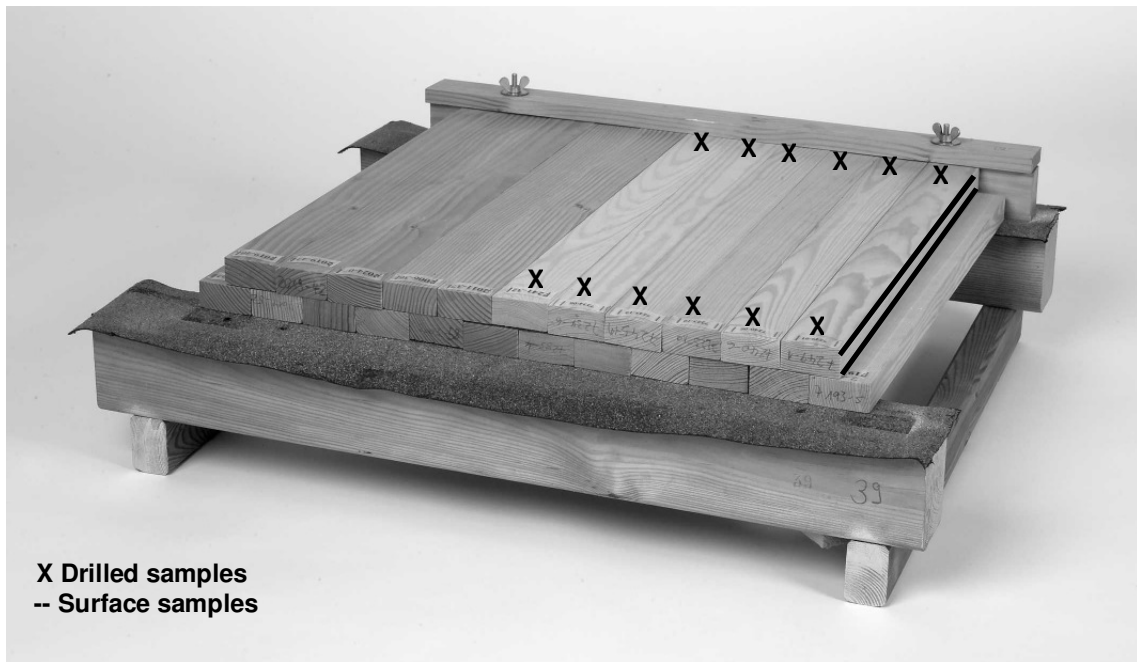


Figure 7.6-1. Photograph showing the double-layer set-up with the upper layer shifted 25 mm horizontally to the lower layer. The set-up is placed on the wood and bitumen supports. X and stripes show where samples were taken. In the upper layer, surface samples were taken from the edges (marked black) of the specimens, In the lower layer, samples were taken from the middle of the top surface (marked black). Drilled samples were taken at the edges of the specimens and pooled in the field.

The double-layer trials in this study were part of a larger investigation (Brischke and Rapp 2005) on the influence of different factors causing decay. The test set-ups were exposed at 32 sites in Europe and the United States and selected for their typical and different defined climates. Climate data at all sites were assured by selecting sites next to an official weather station, where measurements of daily precipitation and average temperature were recorded. The characteristic data for the six southwest German sites at Feldberg, Freiburg, Hinterzarten, Oberrottweil, Sankt Märgen, and Stuttgart are listed in Table 7.6-1. In addition, the sites at Freiburg and Stuttgart were provided with a second test set exposed in artificial shadow (plywood boxes were covered with water-permeable textile sheets).

Table 7.6-1. Height above sea level, total rainfall, average temperature, number of species and decay rating at the different test set-ups for both evaluation intervals.

	Feldberg	Sankt Märgen	Hinterzarten	Freiburg		Stuttgart		Oberrottweil
				Sun	Shadow	Sun	Shadow	
Height above sea level [m]	1496	908	887	302	302	620	620	221
2003 (surface samples)								
Total rainfall [mm]	4695	5299	5974	3063	3063	2560	2560	2692
Average temperature [°C]	4.6	8.6	6.7	12.9	12.9	10.6	10.6	12.2
Number of species	28	19	21	20	21	12	14	17*
Decay rating	0.6	1.0	0.5	6.9	1.3	0.6	1.3	1.5
2004 (drilling samples)								
Total rainfall [mm]	6055	6851	7258	3785	3785	3204	3204	3374
Average temperature [°C]	4.3	8.3	6.9	12.6	12.6	10.4	10.4	12.0
Number of species	20	15	23	26	17	18	6	24
Decay rating	0.8	1.6	1.1	1.3	1.9	1.1	2.1	1.5

*surface samples in Oberrottweil were taken at 2004

Each specimen was evaluated yearly by rating the extent and distribution of decay according to CEN (1989) as: 0 (sound), 1 (slight attack), 2 (moderate attack), 3 (severe attack), or 4 (failure). Visual inspection of the specimens included determination of the decay type (brown, white or soft rot). Sampling procedure Samples for fungal determination were taken from the surface and drilled from the edges of the wood specimens (Figure 7.6-1). Surface samples were scraped from the side of the edges of the upper layer and from the upper surface in the middle of the wood specimen on the bottom layer (Figure 7.6-1). Drill samples were taken at 40 mm from both ends in the centre of the specimen and pooled in the field. Thin layers of wood cells were removed by scraping on both sides before drilling. A 2-mm bit for metal was used to drill straight through the specimen. Because all samples were taken in the field, the amount of sawdust from the drilling varied between 0.4 and 0.7 ml. The scraped samples had a volume of 0.5–1 ml. All tools were carefully sterilised before sampling. The number of wood specimens sampled at each site varied between 6 and 11. In total, surface and drill samples were taken from 76 wood specimens.

Extraction and PCR analysis

The wood material was mechanically disrupted in a Fast Prep[®] System from BIO 101[®] Systems. A 2% (w/v) cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) buffer (CTAB, 1 M Tris-HCl, 5 M NaCl, 0.5 M EDTA) was added to prepared samples.

To extract DNA, the samples were placed in a heating block at 65 °C for 60 min and vortexed every 15 min. Samples were then centrifuged for 10 min and the supernatant was removed to a new tube and 600 µl of 2% CTAB was added to the tube, which was placed in a heating block for 40 min. The samples were then vortexed again every 15 min. The DNA was precipitated with isopropanol and then washed with ice-cold 70% ethanol and cleaned with GeneClean[®] Turbo BIO 101[®] Systems according to the manufacturer's instructions.

Amplification of the nrDNA ITS region was performed using the primers ITS 1F (CTT GGT CAT TTA GAG GAA GTA A) and ITS 4 (CAG GAG ACT TGT ACA CGG TCC AG) for sequencing and T-RFLP analysis. The primers used in T-RFLP analysis were labelled with WellRED fluorescent dyes D3 and D2 (Proligo, Boulder, CO, USA). M13 forward and reverse primers (provided with the cloning kit) were used to amplify the clones. The PCR procedure of Råberg *et al.* (2005) was followed. The PCR products were separated on a 0.9% (w/v) agarose gel in 0.5x TBE buffer. The gel was stained with ethidium bromide for 15 min and then rinsed for another 15 min to confirm the PCR products.

T-RFLP

T-RFLP analysis was performed on all samples. The PCR amplification product was digested with restriction enzymes by incubating 5 µl of the PCR product with 5 µl of enzyme mix (containing 2 U of enzyme per sample) overnight at 37 °C for *CfoI* and 65 °C for *TaqI*. The samples were then separated on a Beckman CEQ TM 8000 Genetic Analysis System according to the manufacturer's instructions. T-RFLP restriction patterns were compared using Microsoft Excel and analysed using TRAMP (Dickie *et al.* 2002).

Cloning

Cloning was performed on a subset of samples that were reamplified, cloned, sequenced and again analysed by T-RFLP to identify each fragment obtained in the previous T-RFLP analysis. Cloning was performed using an Invitrogen[™] TOPO TA Cloning[®] Kit according to the manufacturer's instructions.

Sequencing

PCR amplicons from cloning were purified using QIAGEN™ QIA-quick PCR purification prior to sequencing at the Rudbeck Laboratory, Uppsala, Sweden. The sequences were manually edited and aligned using BioEdit v. 5.0.9. The sequences were matched with DNA sequences from GenBank at NCBI using the expected value in the BLAST search function (Altschul *et al.* 1997) and with sequences from the Department of Wood Science culture collection of decay fungi.

Statistical analysis

Species richness was analysed by calculating species accumulation curves that show the relationship between the cumulative number of taxa found and the sampling intensity. R computer language was used to calculate species accumulation curves (Ihaka and Gentleman 1996). Correlation of the number of species, decay intensity and climatic conditions were analysed by mixed linear models (Littell *et al.* 1996) using the statistical software SAS (2004) and Microsoft Excel; because of skewed distributions, the data were also analysed as square root-transformed data. The decay intensity grades were analysed using ordinal logistic models (Olsson 2002) and test sites were included in the models as a random factor. The presence of different rot types was analysed by logistic regression (Olsson 2002) using the statistical software SAS (2004) and, as in the other analyses, test site was used as a random factor.

7.6.3 Results

We found 62 different fungal species, of which 39 were found four times or more based on T-RFLP, cloning and sequencing. Of these 39 species, 30 were ascomycetes, five were basidiomycetes and four could not be classified (Table 7.6-2). The most common fungus found in this study was *Coniochaeta ligniaria* ((Grev.) Cooke), a soft rot fungus that occurred in 87 of 152 samples (57%). During the first years of above-ground exposure of pine sapwood in this study, soft rot was found more frequently than basidiomycetes, considering both field observations (Table 7.6-3) and results for the T-RFLP analysis. Flattening of the species accumulation curve (Figure 7.6-2) indicates that our sampling approach

7.6 Internal and external fungal flora in above-ground field trials

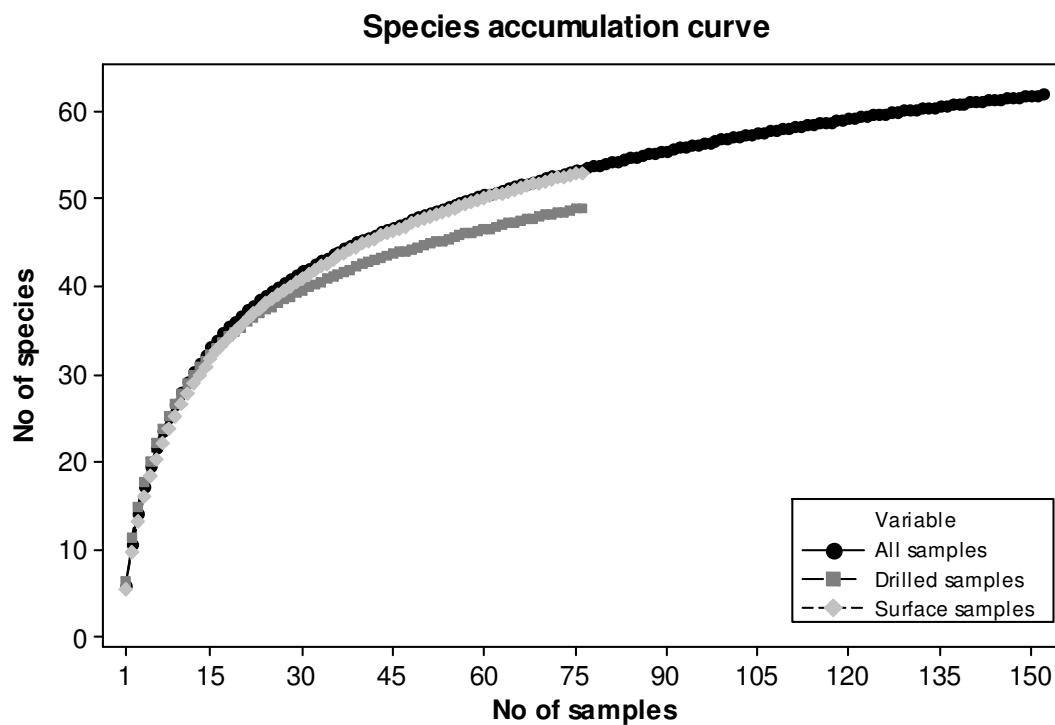
was sufficient for a large proportion of the fungi present, both as a total and for drilled and surface samples taken separately. No significant differences were found between drilled and surface samples (data not shown).

Table 7.6-2. Species found four or more time, occurrence (based on presence or absence in a wood sample, surface or drilled) phylum and distribution at test sites and set-ups.

Fungus	Occur- -rence	Feld- -berg	Sankt -Märgen	Hinter- -zarten	Freiburg		Stuttgart		Ober- -rottweil
					Sun	Shadow	Sun	Shadow	
Ascomycetes and deuteromycetes									
<i>Coniochaeta ligniaria</i>	87	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Sordariomycetes</i> sp. 4	69	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Helotiales</i> sp. 3	59	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 14	53	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Exophiala spinifera</i>	49	x	x	x	x	x	x	x	x
Ascomycete 3	45	x	x	x	x	x	x	x	x
Ascomycete 4	38	x	x	x	x	x	x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 18	35	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Exophiala</i> sp. 2	28			x	x	x	x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 5	24	x	x	x	x	x	x	x	x
Ascomycete 2	21	x		x		x		x	
<i>Pezizomycotina</i> sp.19	21	x	x			x	x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 16	20	x	x	x		x	x		x
<i>Helotiales</i> sp. 1	19	x		x		x	x	x	x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 3	16	x	x	x	x	x	x		x
<i>Sordariomycetes</i> sp. 5	13	x				x		x	x
<i>Sordariomycetes</i> sp. 1	12	x					x	x	
<i>Pezizomycotina</i> sp. 8	12	x		x	x	x	x		x
<i>Herpotrichiellaceae</i> sp.	12				x				x
<i>Hymenoscyphus</i> sp. 2	12				x				
<i>Sordariomycetes</i> sp. 3	9	x	x		x		x		x
<i>Pezizomycotina</i> sp. 12	9	x		x	x	x			
<i>Sordariomycetes</i> sp. 2	8	x		x	x				x
<i>Exophiala</i> sp. 1	8				x		x		
<i>Hymenoscyphus</i> sp. 1	8	x		x	x	x	x		
<i>Pezizomycotina</i> sp. 10	6				x		x		
<i>Pezizomycotina</i> sp. 17	5			x	x				x
<i>Epicoccum nigrum</i>	5	x	x	x					
<i>Pezizomycotina</i> sp. 4	4				x				x
<i>Cladosporium</i> sp	4	x		x	x	x			
Basidiomycetes									
Basidiomycete 2	20	x	x	x	x	x			x
<i>Sistotremastrum</i> sp.	20	x	x				x		x
<i>Rhodotorula lignophila</i>	18	x	x	x	x	x			
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	6	x	x	x	x	x			
Basidiomycete 1	4							x	
Unknown									
Unknown fungus 10	35	x	x	x	x	x		x	x
Unknown fungus 12	34		x	x	x		x	x	x
Unknown fungus 14	24	x	x	x	x	x	x		x
Unknown fungus 13	5	x				x			x

Table 7.6-3. Distribution of rot types in specimens based on visual inspection for both evaluation intervals.

	Feld- berg	Sankt Märgen	Hinter- zarten	Freiburg		Stuttgart		Oberrott- weil	Σ
				Sun	Shadow	Sun	Shadow		
2003 (surface samples)									
Brown rot	0	0	0	0	0	0	0	0	0
White rot	0	0	0	0	0	0	8	5	13
Soft rot	1	2	4	6	5	2	4	5	29
2004 (drilled samples)									
Brown rot	1	0	0	0	0	0	0	0	1
White rot	2	8	4	2	7	0	2	5	30
Soft rot	6	6	9	10	1	5	3	5	45

**Figure 7.6-2. Species accumulation curve for all samples, drilled samples and surface samples. All curves show that the sampling approach adopted was adequate. Drilled samples contain a slightly greater number of species than surface samples.**

The number of species differed significantly between the test sites. However, precipitation, average temperature and height above sea level correlated poorly with the number of species (Table 7.6-4). Therefore, it was assumed that only the combination of different environmental influences might determine the number of species present. The square root-transformed analysis of the skewed

distributions gave the same result. In Freiburg and Stuttgart, test sites had both shaded and sunny set-ups, and these were compared for follow-up analysis. This revealed that in drilled samples, significantly more species occurred in sun-exposed than in shade-exposed set-ups ($p = 0.0002$). In surface samples, no such correlation could be observed ($p = 0.8577$).

Table 7.6-4. p-Values for the relation between number of species and different test sites as a whole, height above sea level, average temperature and precipitation.

	p	
	Drill	Surface
Test site	0.0043**	0.0004***
Height above sea level	0.6053	0.0936
Average temperature	0.6538	0.1445
Precipitation	0.2933	0.3594

** 1% significance

***0,1% significance

The grading of decay intensity showed that the test sites differed significantly in 2003, but not in 2004 (Table 7.6-5). The decay intensity did not differ significantly for precipitation, average temperature or height above sea level as single parameters. However, follow-up comparisons revealed significantly higher site decay intensity in the shade exposed compared to the sun-exposed set-up in both 2003 ($p = 0.0016$) and 2004 ($p = 0.0164$). It seems that initiation of decay differs between sites, and that this difference does not depend on a single parameter, but on all parameters.

Table 7.6-5. p-Values for decay intensity at different test sites as a whole, height above sea level, average temperature and precipitation in the year of sampling.

	p	
	2004	2003
Test site	0.0862	0.0124*
Height above sea level	0.0571	0.1035
Average temperature	0.0884	0.2761
Precipitation	0.3573	0.8720

* 5% significance

For surface samples, the occurrence of soft rot differed significantly among test sites ($p=0.0390$) (Table 7.6-6) according to the T-RFLP analysis. Brown and

white rot seemed to be more evenly distributed among test sites; the drilled samples did not differ and visual determination of rot in the field gave the same impression. Soft rot was the most common type of rot found during both sampling years (Table 7.6-3). Precipitation, average temperature and height above sea level did not affect the decay type when considered as independent (single) parameters (Table 7.6-6).

Table 7.6-6. Significance for rot types in relation to test site as a whole, height above sea level, average temperature and precipitation during 2003 and 2004 according to T-RFLP analysis.

	p					
	Brown rot		White rot		Soft rot	
	2004	2003	2004	2003	2004	2003
Test site	1.0000	1.0000	0.1481	0.9901	0.1299	0.0390*
Height above sea level	0.3886	0.8557	0.8590	0.5132	0.6811	0.8721
Average Temperature	0.4936	0.4995	0.9569	0.9097	0.7732	0.7249
Precipitation	0.8813	0.7014	0.4494	0.3889	0.3025	0.2383

* 5% significance

7.6.4 Discussion

The degradation of wood is a long and complex procedure, depending on the wood material itself, physical and chemical factors influencing the substrate, and interactions between microorganisms and the wood and the microorganisms themselves (Käärik 1974). In this study, the soft rot fungus *C. ligniaria* was the most frequently identified fungus. *Coniochaeta* species are characterised as superficial, spherical, with a dark brown to black ostiolate ascomata, usually with a stiff setae, forming smooth, dark brown simple ascospores with a longitudinal germ slit. *Coniochaeta* species often have a *Phialophora*-like anamorph (Hawksworth and Yip 1981). *C. ligniaria* is a telemorph of *Lecythophora hoffmannii* (anamorph), which is synonymous with *Phialophora hoffmannii*. *P. hoffmannii* is commonly reported in association with wood decay (Käärik 1974; Savonmäki *et al.* 1992), whereas its synonym is less associated with wood decay, but its occurrence has been reported by Hawksworth and Yip (1981), Savonmäki *et al.* (1992) and Allmer *et al.* (2005). Hawksworth and Yip (1981) also reported that the fungus is widespread on dung and wood throughout the Northern Temperate Zone. In a study of phloem

in spruce trees in southern Poland, *C. ligninaria* was seldom isolated (Jankowiak 2005). Another frequently occurring fungus that was fully identified in this study was *Exophiala spinifera* (Nilsen and Conant) McGinnis, also known under the synonyms *Phialophora spinifera* and *Rhinochlaediella spinifera*. The teleomorph of this genus is *Capronia*. *E. spinifera* is often associated with decaying wood, but surprisingly is also a documented human pathogen (de Hoog *et al.* 2000). In a study by Käärik (1974), several soft-rot fungi were found on wood, including several *Phialophora* species, which is one of the anamorphs of the soft rot fungi found in our study. Daniel and Nilsson (1998) also discussed the importance of *Phialophora* spp. in their study of soft rot decay. Typical rot fungi were also found in this study, but much less frequently than expected. White rot fungi were visually observed at all test sites, but not in the sun-exposed set-up in Stuttgart, which was confirmed by TRFLP analysis, showing that no basidiomycetes were present. The abundance of visually observed white-rot decay (Table 7.6-3) increased to a higher degree (22%) compared with brown rot (1%) and soft rot (20%) from 2003 to 2004. The white rot fungi detected by T-RFLP analysis were *Sistotremastrum* sp. and basidiomycete 2; the latter is probably a white rot, as this decay type was observed in the wood specimens. For brown rot decay, fungi found less than four times were *Antrodia serialis* ((Fr.) Donk.) in Freiburg, *G. trabeum* ((Fr.) Murr.) in Feldberg and *Postia placenta* ((Fr.) M.J. Larsen & Lombard) in Oberrotweil.

During primary colonisation and subsequent succession of fungi, the moisture content of the wood is a decisive factor (Käärik 1974). The shade-exposed specimens were exposed to higher moisture content throughout the year than the non-shadowed specimens (Brischke and Rapp 2005). In the present study we did not find any correlation between soft rot and the test site corresponding to higher and lower moisture content. It is a common misconception that soft rot fungi only occur in very wet wood (Blanchette *et al.* 1990; Daniel and Nilsson 1998). This study also refutes this erroneous belief. These fungi can survive wide fluctuations in moisture content, and soft rot has been found in wood that has remained dry for long periods and only occasionally exposed to moisture (Findley 1965; Blanchette *et al.* 1990; Blanchette 2005). Soft rot fungi are considered to mainly have an impact during the early colonisation of wood

(Clubbe 1980; Eaton and Hale 1993). Clubbe (1980) observed that soft rots are displaced quickly by non-decaying and later decaying basidiomycetes in untreated pine. However, this may not always be the case, even though they occur in certain ecological niches (wood substrates) where these fungi can be active due to a lack of competition (Daniel and Nilsson 1998). It can be supposed that soft rot fungi are only replaced if the substrate is favourable for decaying basidiomycetes; otherwise, soft rot fungi remain the essential wood degraders. Soft rot fungi are considered to have much slower decay rates compared with brown and white rot fungi (Käärik 1974). They can degrade wood without additional nutrients, but it has been shown that addition of nitrogen significantly increases the rate of degradation (Findley 1965; Blanchette *et al.* 1990; Daniel and Nilsson 1998).

In this study, the average decay intensity was below 2 for all field samples (Table 7.6-5). The general succession concept for wood is: 1) pioneer saprotrophic fungi (primary moulds); 2) polymer-degrading fungi (stainers and soft rots); 3) secondary opportunistic fungi (soft rots and secondary moulds); and 4) basidiomycetes degraders (brown and white rots) (Käärik 1974; Levy 1982; Dix and Webster 1995; Deacon 2006). According to this general pattern, the succession in this study corresponds to stage 2/early stage 3, with soft rot the main type of decay. This was confirmed by both visual observation and T-RFLP profile results.

In a study by Wälchli (Käärik 1974) in the alpine zone (1000–1700 m above sea level), 33 basidiomycetes, three ascomycetes (33:3) and two myxomycetes were found in avalanche barriers. The height above sea level was not important for the onset of decay. This completely different ratio between basidiomycetes and ascomycetes differs from the present study (5:30) and probably reflects the stage in the succession sequence at which the study was conducted. Savonmäki *et al.* (1992) found 25 different ascomycetes isolated from *P. sylvestris* in Finland, while basidiomycetes were not reported. In an extensive study of the fungal flora of spruce and pine stumps (Käärik and Rennerfelt 1957), the primary colonisers were mainly basidiomycetes. Numerous fungi imperfecti and various *Mucoraceae* were also found. Normally, white and brown rots are generally considered to be active in dryer environments and soft rot in

wet environments, generating an uneven distribution of rot types. Both visual observations (Table 7.6-3) and T-RFLP analysis (Table 7.6-2) confirmed that, although different conditions were found, soft rot was unexpectedly the most frequent type of decay found at all sites during the first years of exposure. All three parameters (precipitation, average temperature and height above sea level) appear to affect species richness for fungi, but no single parameter seems to be more important than the other. Apparently, the initiation of decay (measured as decay intensity) differed among sites, but this difference is probably due to the combined effect of all parameters. For sun and shade exposure, differences in rot progression were expected. Sun exposed specimens may dry out more than shaded specimens, implying that shaded specimens contain a higher level of moisture (Brischke and Rapp 2005). Furthermore, the temperature in the shaded set-up is more even and the maxima and minima are less pronounced than for the sun-exposed set-up. For the shaded set-up, the decay rates were significantly higher in 2003 and 2004. However, the decay rate was not significantly affected by precipitation, average temperature, or altitude.

If sampling had been conducted selectively, choosing wood samples that were discoloured and/or softened, instead of from fixed sites, a greater number of rot fungi may have been detected. Drilling was carried out transversely, allowing for detection of a larger number of fungal species with greater likelihood than in the case of longitudinal drilling, since fungal mycelia spread more easily along wood fibres (Rayner and Boddy 1988). In general, drill samples showed higher species richness (Figure 7.6-2), which is possibly related to the transverse drilling technique applied in this study.

To understand the structure and dynamics of natural fungal communities, PCR-based methods are commonly used. Such methods include amplified ribosomal DNA restriction Analysis (ARDRA) (Schmidt and Moreth 1999), thermal and denaturing gradient gel electrophoresis (TGGE and DGGE) (Kitts 2001) and T-RFLP. All these methods produce a pattern or profile that corresponds to the fungal community structure. The T-RFLP approach delivers robust and reproducible data, which allows rapid analysis of large data sets. Moreover, software is available that automatically digitises the fragment analysis data. This

is an advantage over other methods for which electrophoresis images need to be digitalized manually. Accordingly, simplified statistical analysis is possible. All these possibilities lead to profiles of terminal fragments, which could previously not be observed with this precision. Moreover, the profiles can be used to search for individual organisms within a community profile. Profiles generated by DGGE can best be compared on the same gel because of the lower resolution inherent to the electrophoresis system (Kitts 2001). In contrast, the advantage of DGGE over T-RFLP is the possibility of direct cloning of profile elements (reusing the DNA of a certain profile for identification), whereas the T-RFLP profile is destructively sampled and the DNA cannot be reused to identify a specific profile. This means that a database of T-RFLP profiles is necessary for identification of a specific profile in T-RFLP analysis. After establishing such a library, searches for a specific fungal species or community structures will be facilitated.

In summary, no single geographic or climatic parameter observed in this study seemed to be decisive in determining the richness of fungal species or decay intensity. Instead, a combination of all parameters prevalent on a test site affects both the richness of fungal species and the decay intensity. Soft rot was the most abundant decay type, a finding that is consistent with the general concept of the succession of decay fungi. Adopting this concept, the average decay intensity was grade 2 in this study.

7.6.5 Acknowledgements

We would like to thank Katarina Ihrmark for advice and help with laboratory work, Ulf Olsson for help with statistical analysis, Geoffrey Daniel for valuable comments and Franziska Büschelberger for extensive support in starting the field trials.

7.6.6 References

Adair, S., Kim, S.H., Breuil, C. (2002) A molecular approach for early monitoring of decay basidiomycetes in wood chips. *FEMS Microbiol. Lett.* 211:117-122.

- Allmer, J., Vasiliaukas, R., Ihrmark, K., Stenlid, J., Dahlberg, A. (2005) Wood-inhabiting fungal communities in woody debris of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) as reflected by sporocarps, mycelial isolation and T-RFLP identification. *FEMS Microbiol. Ecol.* 55:57–67.
- Altschul, S.F., Madden, T.L., Schäffer, A.A., Zhang, J., Zhang, Z., Miller, W., Lipman, D.J. (1997) Gapped BLAST and PSIBLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Res.* 25:3389–3402.
- Blanchette, R.A. (2005) Environmental factors influencing microbial growth inside the historic expedition hut of Ross Island, Antarctica. *Int. Biodeter. Biodegrad.* 55:45–53.
- Blanchette, R.A., Nilsson, T., Daniel, G., Abad, A. (1990) Biological degradation of wood. In: *Archaeological Wood: Properties, Chemistry, and Preservation*. Eds. Rowell, R.M., Barbour, R.J. American Chemical Society, Washington, DC. pp. 141–173.
- Brischke, C., Rapp, A.O. (2005) Experimental approach for service life prediction of wooden materials. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France, 17–21 April 2005. TT6-198.
- Carey, J.K. (2002a) L-joint trials: Part 1: Observations on the process of colonisation and decay. Document No. IRG/WP 02-20250. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- Carey, J.K. (2002b) L-joint trials: Part 2: The relationship between colonisation by decay fungi and long-term performance. Document No. IRG/WP 02-20251. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- CEN (1989) EN 252. Field test method for determining the relative protective effectiveness of wood preservatives in ground contact. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- CEN (1992) EN 335-1. Classification of hazard classes. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- CEN (1993) EN 330. Wood preservatives. Field-test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative for use under a

- coating and exposed out-of ground contact. L-joint method. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- CEN (1996) ENV 12037. Wood preservatives. Field test method for determining the relative effectiveness of a wood preservative exposed out of ground contact. Horizontal lap-joint method. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- CEN (1997) EN 113 Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood-destroying basidiomycetes. Determination of toxic values. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium.
- Clubbe, C.P. (1980) The colonisation and succession of fungi in wood. Document No. IRG/WP 1107. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- Daniel, G., Nilsson, T. (1998) Development in the study of soft rot and bacterial decay. In: Forest Products Biotechnology. Eds. Bruce, A., Palfreyman, J.W. Taylor and Francis, London. pp. 37–62.
- Deacon, J.W. Fungal Biology. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2006.
- de Hoog, G.S., Guarro, J., Gene, J., Figueras, M.J. (2000) Atlas of Clinical Fungi. 2nd edition, Vol. 1. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht, The Netherlands.
- Dickie, I.A., Xu, B., Koide, R.T. (2002) Vertical niche differentiations of ectomycorrhizal hyphae in soil as shown by T-RFLP analysis. *New Phytol.* 156:527–535.
- Diehl, S.V., McElroy, T.C., Prewitt, M.L. (2004) Development and implementation of a DNA-RFLP database for wood decay and wood associated fungi. Document No. IRG/WP 04-10527. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- Dix, N.J., Webster, J. (1995) Fungal Ecology. Chapman and Hall, London. p. 549.
- Eaton, R.A., Hale, M.D.C. Wood, Decay, Pests and Protection. Chapman and Hall, London, 1993.
- Findley, W.P.K. (1965) Ecology of wood-destroying and wood inhabiting fungi. *Holz Organism.* 1:199–211.

-
- Hawksworth, D.L., Yip, H.Y. (1981) *Coniohaeta angustispora* sp. nov. from roots in Australia, with a key to species known in culture. *Aust. J. Bot.* 29:377–384.
- Högberg, N., Land, C.J. (2004) Identification of *Serpula lacrymans* and other decay fungi in construction timber by sequencing of ribosomal DNA – A practical approach. *Holzforschung* 58:199–204.
- Ihaka, R., Gentleman, R. (1996) A language for data analysis and graphics. *J. Comput. Graph. Stat.* 5:299–314.
- Jankowiak, R. (2005) Fungi associated with *Ips typographus* on *Picea abies* in southern Poland and their succession into the phloem and sapwood of beetle-infested trees and logs. *For. Pathol.* 35:37–55.
- Jasalavich, C.A., Ostrofsky, A., Jellison, J. (2000) Detection and identification of decay fungi in spruce wood by restriction fragment length polymorphism analysis of amplified genes encoding rRNA. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:4725–4734.
- Jellison, J., Jasalavich, C., Ostrofsky, A. (2003) Detecting and identifying wood decay fungi using DNA analysis. In: *Wood Deterioration and Preservation: Advances in our Changing World*. Eds. Goodell, B., Nicholas, D.D., Schultz, T.P. American Chemical Society, Washington, DC. pp. 346–357.
- Käärik, A. (1974) Decomposition of wood. In: *Biology of Plant Litter Decomposition*. Eds. Dickinson, C.H., Pugh, G.J.F. Academic Press, New York. pp. 129–174.
- Käärik, A., Rennerfelt, E. (1957) [Investigation of the fungal flora of spruce and pine stumps] (in Swedish). *Meddelande från Statens Skogsforskningsinstitut* 47:7.
- Kitts, C.L. (2001) Terminal restriction fragment patterns: A tool for comparing microbial communities and assessing community dynamics. *Curr. Iss. Intest. Microbiol.* 2:17–25.
- Levy J.F. (1982) The place of basidiomycetes in the decay of wood in contact with the ground. In: *Decomposer Basidiomycetes: Their Biology and Ecology*. Eds. Frankland, J., Hedger, J.N., Swift, M.J. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 161–178.

- Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D. SAS System for Mixed Models. SAS Institute, Cary, NC, USA, 1996.
- Moreth, U., Schmidt, O. (2000) Identification of indoor rot fungi by taxon-specific priming polymerase chain reaction. *Holzforschung* 54:1–8.
- Olsson, U. Generalized Linear Models: An Applied Approach. Studentlitteratur, Lund, Sweden, 2002.
- Råberg, U., Högberg, N., Land, C.J. (2004) Identification of brown rot fungi on wood in above ground conditions by PCR, T-RFLP and sequencing. Document No. IRG/WP 04-10512. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- Råberg, U., Högberg, N.O.S., Land, C.J. (2005) Detection and species discrimination using rDNA T-RFLP for identification of wood decay fungi. *Holzforschung* 59:696–702.
- Rapp, A.O., Augusta, U. (2004) The full guideline for the “double layer test method” – A field test method for determining the durability of wood out of ground. Document No. IRG/WP 04- 20290. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- Ray, M.J., Dickinson, D.J., Buck, M. (2004) *Aureobasidium* or *Hormonema*? A genetic approach. Document No. IRG/WP 04-10529. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden.
- Rayner, A.D.M., Boddy, L. Fungal Decomposition of Wood: Its Biology and Ecology. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1988.
- Savonmäki, S., Salonen, A., Ruokola, A.-L. (1992) Microfungi isolated from wood of Scots pine in Finland. *Karstenia* 32: 65–70.
- SAS (2004) SAS/Stat User’s Guide, Version 9. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Schmidt, O. (2000) Molecular methods for the characterization and identification of the dry rot fungus *Serpula lacrymans*. *Holzforschung* 54:221–228.
- Schmidt, O. Wood and Tree Fungi – Biology, Damage, Protection, and Use. Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- Schmidt, O., Moreth, U. (1999) Identification of the dry rot fungus, *Serpula lacrymans*, and the wild Merulius, *S. himantioides*, by amplified ribosomal DNA restriction analysis (ARDRA). *Holzforschung* 53:123–128.

- Schmidt, O., Moreth, U. (2000) Species-specific PCR primers in the rDNA-ITS region as a diagnostic tool for *Serpula lacrymans*. Mycol. Res. 104:69-72.
- Schmidt, O., Moreth, U. (2003) Molecular identity of species and isolates of internal pore fungi *Antrodia* spp. and *Oligoporus placenta*. Holzforschung 57:120–126.
- Schmidt, O., Grimm, K., Moreth, U. (2002) Molecular identity of species and isolates of the *Coniophora* cellar fungi. Holzforschung 56:563–571.

Received July 5, 2006. Accepted October 7, 2006.

7.7 Publikation VII: The influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood and oak heartwood in ground contact

Wood Material Science and Engineering, Vol. 2: pp. 00-00, 2007 • Copyright © by Taylor & Francis • London. DOI: 10.1080/17480270701273015

Wood Material Science and Engineering
2007, 1 7, iFirst article



ORIGINAL ARTICLE

The influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood and oak heartwood in ground contact

ANDREAS OTTO RAPP, CHRISTIAN BRISCHKE & CHRISTIAN ROBERT WELZBACHER

Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for Wood Biology and Wood Protection, Hamburg, Germany

Abstract

The durability of wood in ground contact is affected by numerous influences, such as substrate quality, climate and microflora of the soil, which need to be considered for the prediction of service life of wooden components to be used in the ground. In this study the influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and oak heartwood (*Quercus petraea* Liebl.) was investigated. Mini-stakes were exposed in six different soils at the test site of the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH) in Hamburg, Germany. The effect of partly embedding the test samples in concrete or polyethylene films was also examined. After 3 years of exposure the decay rates for both wood species differed significantly between the soil substrates. Compost soil and fertilized test field soil induced the highest decay activity, whereas in pure sand the lowest decay rates were observed. Surprisingly, exposure in gravel also led to higher decay ratings than sand. Protective measures by means of concrete embedding and polyethylene films performed well during the first 2 years of exposure, but showed increasing decay rates in the third year. The overall decay rating for all soil types was higher for oak heartwood than for pine sapwood. The meaning of different soils, independent of other site influences, for service life prediction of wood is discussed, and the need for further studies on this topic is highlighted.

Keywords: *Compost, concrete embedding, fertilizer, polyethylene film, sand, service life prediction, shrink film, soft rot, soil type, white rot.*

Introduction

The durability of wood depends on its material inherent resistance against wood-destroying organisms as well as on various environmental impacts. To predict service life of natural durable or preservative-treated timber, exposure conditions of differing severity need to be considered, because different service lives and durability can be obtained in different use classes (Brischke et al., 2006). One of the most severe exposures is the in-ground exposition, which is therefore most frequently used for field testing of preservative-treated wood (e.g. EN 252, 1990). In addition to differences between the use classes, results from in-ground durability testing vary between test sites (Johnson et al., 1987; Nilsson & Edlund, 1995; Edlund, 1998; Leicester et al., 2003; Barnes et al., 2006; Edlund et al., 2006; Wakeling

2006). Nilsson and Edlund (1995) gave an overview of factors determining the type and rate of decay of in-ground field test sites, such as substrate quality, occurrence and frequency of different microbes, their wood-degrading capacity and tolerance to preservatives, soil quality (e.g. structure, chemistry, pH, temperature, moisture, nutrients) and climate. The overall conclusion of various studies on the influence of the test site (e.g. Johnson et al., 1987; Edlund, 1998; Wakeling, 2006) on in-ground performance of timber was that at least three different test sites, representing the main types of decay (brown rot, white rot, soft rot, bacteria), are needed to provide the full spectrum of wood-degrading organisms within the test. Besides the intersite variability in decay potential, an intrasite variability in means of spots of high decay intensity was

Correspondence: C. Brischke, Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for Wood Biology and Wood Protection, Leuschnerstr. 91, D-21031 Hamburg, Germany. E-mail: c.brischke@holz.uni-hamburg.de

(Received 8 August 2006; accepted 8 February 2007)

ISSN 1748-0272 print/ISSN 1748-0280 online © 2007 Taylor & Francis
DOI: 10.1080/17480270701273015

ANDREAS OTTO RAPP, CHRISTIAN BRISCHKE & CHRISTIAN ROBERT WELZBACHER

Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for Wood Biology and Wood Protection, Hamburg, Germany

Abstract

The durability of wood in ground contact is affected by numerous influences, such as substrate quality, climate and microflora of the soil, which need to be considered for the prediction of service life of wooden components to be used in the ground. In this study the influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and oak heartwood (*Quercus petraea* Liebl.) was investigated. Mini-stakes were exposed in six different soils at the test site of the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH) in Hamburg, Germany. The effect of partly embedding the test samples in concrete or polyethylene films was also examined. After 3 years of exposure the decay rates for both wood species differed significantly between the soil substrates. Compost soil and fertilized test field soil induced the highest decay activity, whereas in pure sand the lowest decay rates were observed. Surprisingly, exposure in gravel also led to higher decay ratings than sand. Protective measures by means of concrete embedding and polyethylene films performed well during the first 2 years of exposure, but showed increasing decay rates in the third year. The overall decay rating for all soil types was higher for oak heartwood than for pine sapwood. The meaning of different soils, independent of other site influences, for service life prediction of wood is discussed, and the need for further studies on this topic is highlighted.

Keywords: Compost, concrete embedding, fertilizer, polyethylene film, sand, service life prediction, shrink film, soft rot, soil type, white rot.

7.7.1 Introduction

The durability of wood depends on its material inherent resistance against wood-destroying organisms as well as on various environmental impacts. To predict service life of natural durable or preservative-treated timber, exposure conditions of differing severity need to be considered, because different service lives and durability can be obtained in different use classes (Brischke *et al.*, 2006). One of the most severe exposures is the in-ground exposition, which is therefore most frequently used for field testing of preservative-treated wood (e.g. EN 252, 1990). In addition to differences between the use classes, results from in-ground durability testing vary between test sites (Johnson *et al.*, 1987; Nilsson & Edlund, 1995; Edlund, 1998; Leicester *et al.*, 2003; Barnes *et al.*, 2006; Edlund *et al.*, 2006; Wakeling 2006a). Nilsson and Edlund (1995) gave an overview of factors determining the type and rate of decay of in-ground field test sites, such as substrate quality, occurrence and frequency of different microbes, their wood-degrading capacity and tolerance to preservatives, soil quality (e.g. structure, chemistry, pH, temperature, moisture, nutrients) and climate. The overall conclusion of various studies on the influence of the test site (e.g. Johnson *et al.*, 1987; Edlund, 1998; Wakeling, 2006) on in-ground performance of timber was that at least three different test sites, representing the main types of decay (brown rot, white rot, soft rot, bacteria), are needed to provide the full spectrum of wood-degrading organisms within the test. Besides the intersite variability in decay potential, an intrasite variability in means of spots of high decay intensity was observed (Edlund, 1998; Wakeling, 2006) and needs to be considered.

In this study the influence of different soils, and different modifications of the soil contact of wood, respectively, on the service life of Scots pine sapwood and oak heartwood was investigated at the same field site to avoid the impact of climate and a test site-specific microflora. Therefore, modifications of pure natural top soil were used to reflect situations that are common in landscaping and gardening. Furthermore, alternative ways of embedding wooden structures for exposure in ground contact were considered. The influence of concrete embedding on the durability of wood palisades and piles has been controversial

since the 1980s (Murphy, 1984; Leightley & Willoughby, 1985), and no reliable information is available as to whether concrete collars negatively or positively affect the service life of wood. Shrink-wrapping of timber is used as a mechanical barrier against marine borers (Steiger & Horeczko, 1981; Eaton, 1984) and may also work as a measure to avoid soil contact when used for wood in in-ground exposure, as shown by Baecker (1993a, b). Therefore, stakes embedded in concrete and polyethylene (PE) foil-wrapped stakes were included in this trial.

7.7.2 Material and methods

Mini-stake specimens of 200 x 20 x 8 mm³ with growth rings at 90 ± 15° to the broad faces were cut from clear Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) and oak heartwood (*Quercus petraea* Liebl.) and exposed to different types of soil at a field test site of the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH) in Hamburg-Lohbrügge, Germany, in June 2003. For preparation of the exposure to different substrates the top layer of the BFH test field was removed up to 25 cm in depth and the different soil substrates were filled into excavations of 25 x 20 x 300 cm³ (depth x width x length), which were separated from each other and the subjacent ground by a horticultural water-permeable foil.

For each wood species/exposure combination 10 replicates were used. In addition, 10 pine sapwood specimens were tightly wrapped and taped with PE film on three-quarters of their length, including the soil-exposed end-grain, and put into the field soil or the compost soil (Figure 7.7-1). A description of the different soil substrates used in this study is given in Table 7.7-1. The water-holding capacity of the soil substrates was determined after ENV 807 (2001). Two-thirds of the length of each specimen was put into the soil. The distance between the specimens was 10 cm. For exposure in concrete the specimens were concreted in flexible tubes of 65 mm diameter. The concrete blocks were then put into field soil (Figure 7.7-1).

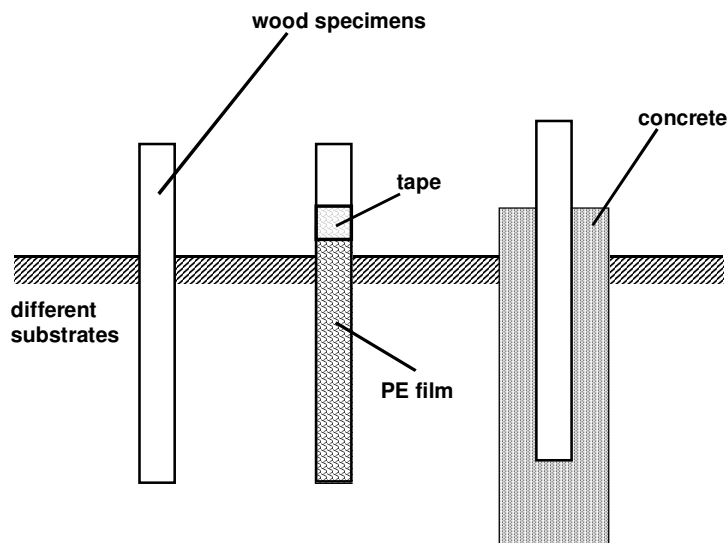


Figure 7.7-1. Exposure situations of the specimens in unmodified and modified contact with different substrates. PE = polyethylene.

Table 7.7-1. Description of the different soil substrates and replicates used.

Soil type	Description	Water holding capacity [%]	No. of replicates used
Field soil	Top soil from in-ground test field of BFH in Hamburg-Lohbrügge	25.8	10 x Scots pine sapwood 10 x Oak heartwood 10 x Pine sapwood PE foil wrapped
Sand	Silica sand; grain size: approx. 0.5-3.0 mm	8.8	10 x Scots pine sapwood 10 x Oak heartwood
Field + sand	Field soil and sand mixed 50:50	18.5	10 x Scots pine sapwood 10 x Oak heartwood
Compost	Compost soil made at BFH from horticultural waste (leaf litter, grass, cut softwoods and hardwoods, sand)	29.4	10 x Scots pine sapwood 10 x Oak heartwood 10 x Pine sapwood PE foil wrapped
Gravel	Gravel; grain size: approx. 15-40 mm	- ^a	10 x Scots pine sapwood 10 x Oak heartwood
Field soil + fertilizer	Field soil; 80 g/m ² fertilizer added once a year Fertilizer contains: 7% nitrogen, 4% phosphorus pentoxide, 9% potassium oxide, 2% magnesium oxide, 7.8% sulphur, 0.018% zinc	25.8	10 x Scots pine sapwood 10 x Oak heartwood
Concrete	Specimens concreted (Portland cement) in blocks of 14.0 cm height and 6.5 diameter by 2/3 of their length	- ^a	10 x Scots pine sapwood 10 x Oak heartwood

Note: PE = polyethylene

^aMeasurement not possible

All specimens were evaluated with respect to decay once a year according to the rating scheme of EN 252 (1990), *i.e.* 0 = no attack, 1 = slight attack, 2 = moderate attack, 3 = severe attack and 4 = failure. The duration of the exposure intervals and corresponding average air temperature and sum of precipitation

are listed in Table 7.7-2. In addition, the specimens were visually inspected regarding the presence of brown rot, white rot or soft rot.

Table 7.7-2. Average air temperature and sum of precipitation for the time intervals between the different decay assessments.

Time intervals between assessments	Average air temperature [°C]	Sum of precipitation [mm]
21.06.03 – 01.10.04	12.2	993
02.10.04 – 07.06.05	7.4	507
08.06.05 – 08.06.06	9.5	600

7.7.3 Results and discussion

Decay rates

The decay rates for both wood species, pine sapwood and oak heartwood, differed significantly between the different soil substrates (Figure 7.7-2 and Figure 7.7-3). After 3 years of exposure the field soil with fertilizer caused the highest decay rating on oak (decay rating 3.8), followed by the compost (3.4). The lowest decay activity was observed in pure sand (1.4). The highest decay ratings for pine were achieved in compost (3.4), followed by field soil with fertilizer (2.8). The high decay activity of compost soils is supported by Mieß (1997) and Edlund (1998). Fertilization may increase decay activity in ground contact, because some nutrients, especially nitrogen, are limiting factors for decay fungi owing to their restricted availability in wood (Rayner & Boddy, 1988; Schmidt, 2006). However, the effect of externally supplied nitrogen on the decomposition rates in soil substrates is still not fully understood and depends on its availability for fungi (Hobbie, 2005). The lowest decay activity on pine was observed in the concreted samples, for which a decay rating of 1.1 was obtained.

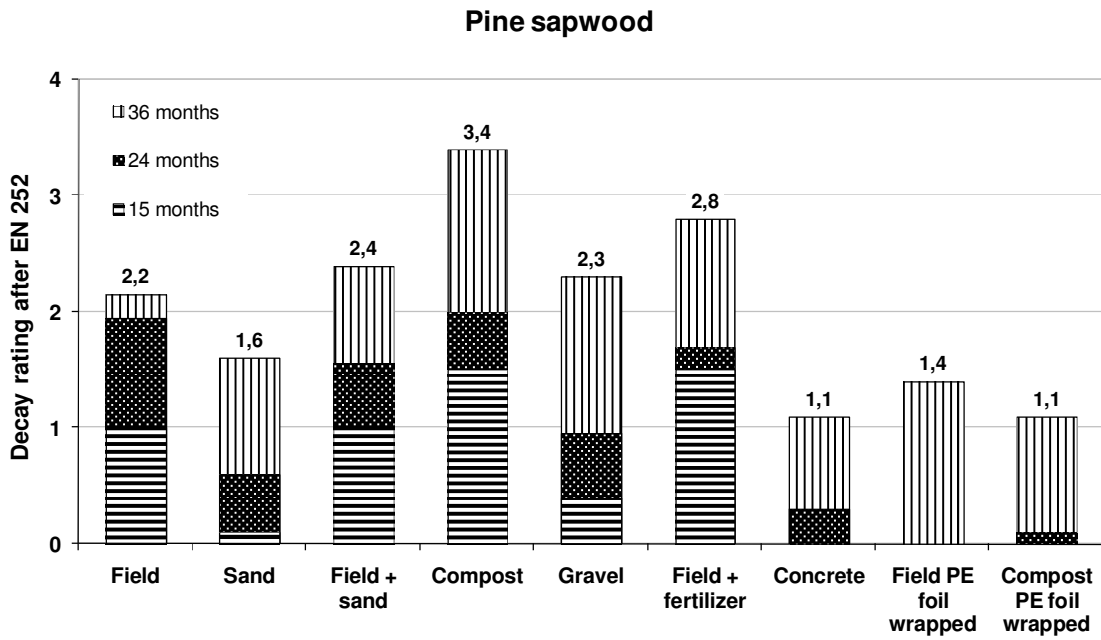


Figure 7.7-2. Decay rating for Scots pine sapwood samples after 3 years of exposure in different substrates and for different wood-soil contact modifications after EN 252 (1990): 0 = no attack; 1 = slight attack; 2 = moderate attack; 3 = severe attack; 4 = failure. PE = polyethylene.

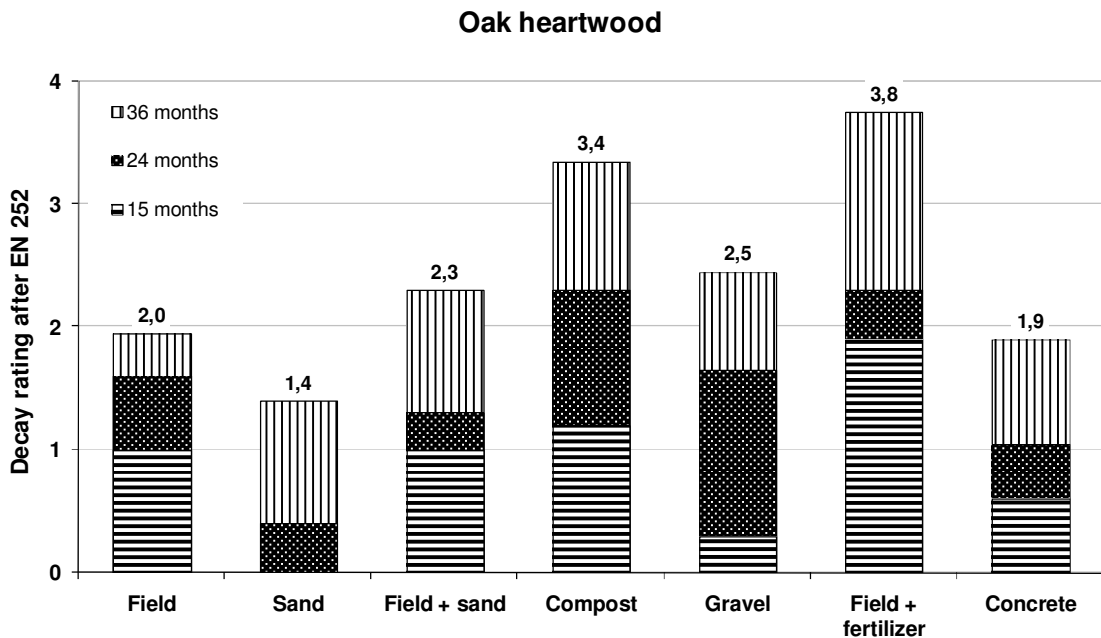


Figure 7.7-3. Decay rating for oak heartwood samples after 3 years of exposure in different substrates and for different wood-soil contact modifications after EN 252 (1990): 0 = no attack; 1 = slight attack; 2 = moderate attack; 3 = severe attack; 4 = failure.

The decay development for pine and oak exposed in field soil and field soil with sand were similar, and therefore no significant effect of the sand admixture was observed. Compared with pure sand, the decay rates of all field soil-containing soil types were significantly higher, but the differences between sand and field soil-containing substrates did not increase after the second year of exposure. Therefore, it will be of interest, whether the better performance of the specimens in sand will persist in the future or will be compensated for by comparatively high decay activity in sand during the following years.

Gravel as a substrate did not lead to reduced decay rates compared with sand. The decay activity in gravel was clearly higher than in sand over the whole period. An inhibitory effect of the low water-holding capacities of these substrates was not observed. The embedding of specimens in concrete led to a reduced decay activity, especially for pine. The stronger increase in the decay rates within the third year of exposure may indicate that this effect will be neutralized or even reversed during the following years. Since moisture increased in the embedded part of a stake, it seems likely that improved conditions for the onset of decay will be established. Similar effects are well known from defective coatings: water will be taken up, desorption is hindered and moisture accumulation occurs (Rapp *et al.*, 1998; Derbyshire & Carey, 2001). To avoid such water traps in foundations with direct wood-concrete contact, protection by design needs to be considered, e.g. using bituminous interfaces or piles overlapping the concrete collar.

The application of PE tubes to pine sapwood specimens led to significantly lower decay rates compared with all other substrates during the first 2 years of exposure. However, during the third exposure year the PE-wrapped specimens showed one of the strongest increases in decay intensity. In combination with water penetration through the tubes or water accumulation inside the tubes, which was observed in different specimens during the 3 year evaluation, further increase in decay rate can be expected. This is supported by Baecker (1993a), who found only temporary protection of untreated Eucalyptus poles by applying open-ended cylindrical PE sleeves.

The overall decay rating for all soil types was higher for oak heartwood than for pine sapwood. The surprisingly low durability of oak, which is classified after EN

350-2 (1994) as durable, is supported by Rapp *et al.* (2006) and Welzbacher and Rapp (2007), who rated oak in soil contact as being between less durable and not durable.

Occurrence of rot types

The visual inspection of the specimens with regard to the occurrence of different rot types clearly showed the predominance of soft rot for both wood species and nearly all soil substrates after 3 years of exposure. The frequency of occurrence of soft rot and white rot can be seen from Figure 7.7-4 and Figure 7.7-5, respectively; no brown rot decay was observed. All pine specimens in field soil, sand, field soil plus sand, gravel, and field soil plus fertilizer were attacked by soft rot. The same result was found for oak specimens in field soil, field soil plus sand, gravel and concrete. In contrast, only one single PE foil-wrapped pine specimen showed soft rot. The dominating role of soft rot in different soil types is also supported by Nilsson and Daniel (1990), Wakeling (1992) and Edlund (1998), whereby the occurrence of soft rot-causing fungi is independent from their decay activity.

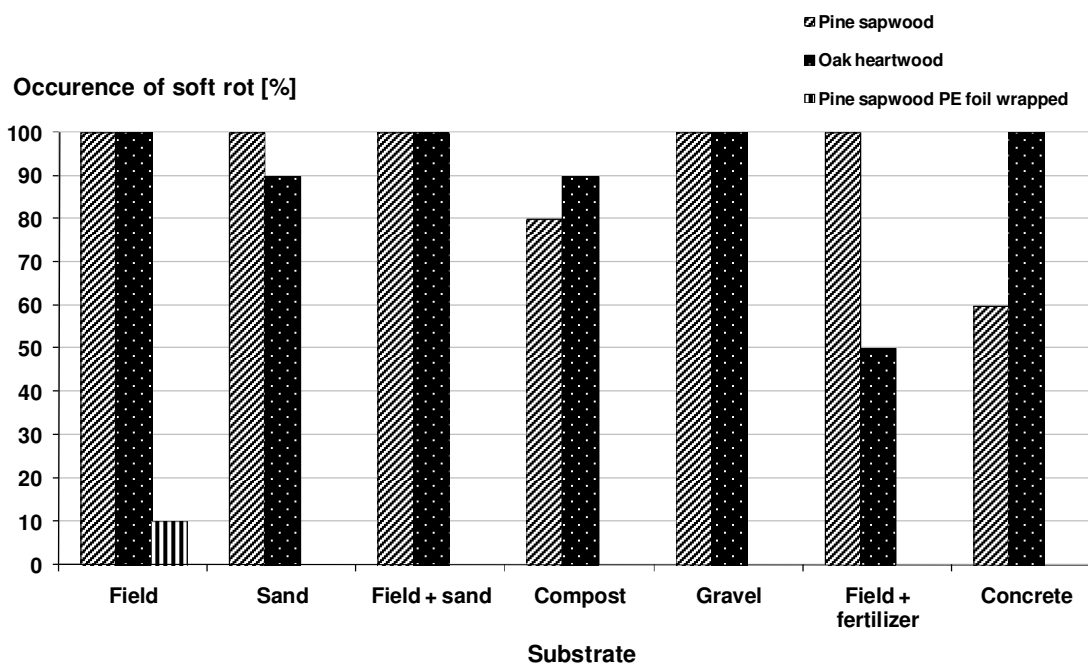


Figure 7.7-4. Occurrence of soft rot on pine sapwood and oak heartwood samples in different substrates and for different wood-soil contact modifications. PE = polyethylene.

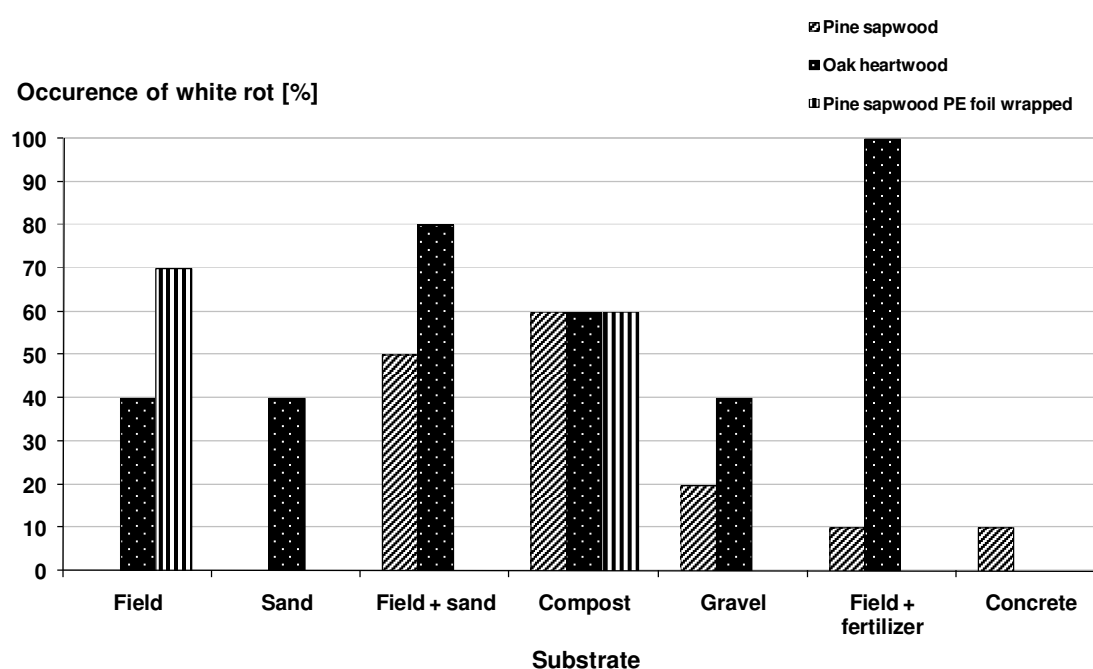


Figure 7.7-5. Occurrence of white rot on pine sapwood and oak heartwood samples in different substrates and for different wood-soil contact modifications. PE = polyethylene.

Differences in the occurrence of white rot were observed between the soil substrates as well as between the two wood species. The highest frequency of white rot was found for oak specimens exposed to field soil plus fertilizer (100%), followed by field soil plus sand (80%). No white rot was found for the concreted oak specimens. The occurrence of white rot on pine specimens was significantly lower than on oak. However, the PE-wrapped pine specimens showed a high incidence of white rot, between 60 and 70%. Considering the abrupt increase in decay activity (Figure 7.7-2) and the observed water penetration during the third year of exposure, further intensive white-rot decay can be expected.

7.7.4 Conclusions

The variety in decay activity and active decay types in different soil substrates, independent of other site-influencing factors, such as climate and existing microflora, was well demonstrated in this study. The decay activity between the examined substrates differed up to a factor of 3.1 (pine in concrete : pine in compost). Therefore, the soil substrate itself should be considered as one important subfactor of in-ground test sites. The need to cover the whole range

of wood-degrading organisms when testing natural durable or preservative-treated timber requires the use of different test sites. The service life prediction of wooden components requires consideration of all aspects that have an influence on wood durability, including the soil substrate or other foundation measures. Modifications of pure natural topsoil, which are commonly used in landscaping and gardening, revealed remarkable differences in decay rates and should therefore be addressed in future studies. Furthermore, a notable effect of fertilizer in terms of increased decay activity was observed. Although the performance of mini-stakes can be very similar to the performance of full-sized stakes, it seems likely that differences will be obtained, especially when design-related measures are involved (e.g. concrete embedding, PE foil wrapping). Accordingly, the results obtained after 3 years of exposure in this study need to be seen as screening results to be supported by results from further field trials, including larger test sites and full-sized stakes, which are already in progress.

7.7.5 References

- Baecker, A. A. W. (1993a). *A non-pressure method of protection based on hurdle theory to control the spectrum of internal environmental factors which affect the decay of poles in soil contact* (Document No. IRG/WP 93-20005). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Baecker, A. A. W. (1993b). A non-toxic method to combat incipient decay of CCA- and creosote-treated poles in soil-contact. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 32, 289-303.
- Barnes, H. M., Amburgey, T. L. & Sanders, M. G. (2006). The impact of test site and oil content on the performance of pentachlorophenol-treated wood. *Forest Products Journal*, 56, 43-47.
- Brischke, C., Rapp, A. O. & Bayerbach, R. (2006). Decay influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering*, 1, 91-107.
- Derbyshire, H. & Carey, J. K. (2001). *Evaluating joinery preservatives: performance prediction using BS EN 330 L-joint trials*. IP2/01. Watford: BRE.

- Eaton, R. A. (1984). *A collaborative test to determine the efficacy of polyurethane coatings on wood samples exposed in the marine environment* (Document No. IRG/WP/4113). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Edlund, M.-L. (1998). Durability of untreated wood exposed in terrestrial test fields and microcosms. *Material und Organismen*, 32, 235-275.
- Edlund, M.-L., Evans, F. G., Henriksen, K. & Nilsson, T. (2006). *Testing durability of treated wood according to EN 252 Interpretation of data from Nordic test fields* (Document No. IRG/WP 06-20341). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- European Committee for Standardization (1990). EN 252. *Wood preservatives. Field test methods for determining the relative protective effectiveness in ground contact*.
- European Committee for Standardization (1994) EN 350-2. *Durability of wood and wood-based products. Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe*.
- European Committee for Standardization (2001). ENV 807. *Wood preservatives. Determination of the toxic effectiveness against soft rotting micro-fungi and other soil inhabiting micro-organisms*.
- Hobbie, S. E. (2005). Contrasting effects of substrate and fertilizer nitrogen on the early stages of litter decomposition. *Ecosystems*, 8, 644-656.
- Johnson, G. C., Thornton, J. D. & Saunders, I. W. (1987). An in-ground natural durability field test of Australian timbers and exotic reference species. III. Results after approximately 15 years' exposure. *Material und Organismen*, 21, 251-264.
- Leicester, R. H., Wang, C.-H., Nguyen, M. N., Thornton, J. D., Johnson, G., Gardner, D., *et al.* (2003). *An engineering model for the decay of timber in ground contact* (Document No. IRG/ WP 03-20260). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Leightley, L. E. & Willoughby, G. A. (1985). *The effect of concrete embedment on CCA treated hardwood and softwood timbers* (Document No. IRG/WP 3340). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.

-
- Mieß, S. (1997). *Einfluß des Wasserhaushaltes auf Abbau und Fäuletypen in terrestrischen Mikrokosmen*. Diploma thesis, University of Hamburg, Germany.
- Murphy, R. J. (1984). *Wood in concrete. Summary of discussion at IRG 14, Surfers Paradise, Australia* (Document No. IRG/WP/ 3264). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Nilsson, T. & Daniel, G. (1990). *Decay types observed in small stakes of pine and Alstonia scholaris inserted in different types of unsterile soil* (Document No. IRG/WP/1443). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Nilsson, T. & Edlund, M.-L. (1995). *Laboratory versus field tests for evaluating wood preservatives: A scientific view* (Document No. IRG/WP 95-20076). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Rapp, A. O., Augusta, U. & Brandt, K. (2006). *The natural durability of wood in different use classes - Part II* (Document No. IRG/WP 06-10598). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Rapp, A. O., Peek, R.-D. & Sailer, M. (1998). Feuchteverlauf von Holzproben mit und ohne Oberflächenbehandlung während zwei Jahren Freibewitterung. In *Beiträge zur 21. Holzschutztagung der DGfH*, Rosenheim, Germany, 21-23 April 1998.
- Rayner, A. D. M. & Boddy, L. (1988). *Fungal decomposition of wood - its biology and ecology*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Schmidt, O. (2006). *Wood and tree fungi. Biology, damage, protection, and use*. Berlin: Springer.
- Steiger, F. & Horeczko, G. (1981). *Controlling marine borer attack of timber piles with plastic wraps* (Document No. IRG/WP/ 479). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Wakeling, R. N. (1992). *A study of the decay type potential of seven soils* (Document No. IRG/WP 92-1532). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.
- Wakeling, R. N. (2006). *Is field test data from 20x20 mm stakes reliable? Effects of decay hazard, decay type and preservative depletion hazard*

(Document No. IRG/WP 06-20327). Stockholm: International Research Group on Wood Protection.

Welzbacher, C. R. & Rapp, A. O. (2007). Durability of thermally modified timber from industrial-scale processes in different use classes: Results from laboratory and field tests. *Wood Material Science and Engineering*, 2,00-00.

8 PUBLIKATIONEN OHNE REVIEW-VERFAHREN

Publikation VIII **Brischke C, Rapp AO (2007)** A roadmap for performance-based specification of wooden components based on service life prediction. Document No. IRG/WP 07-20351. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden

8.1 Publikation VIII: A roadmap for performance-based specification of wooden components based on service life prediction

Document No: IRG/WP/07- 20351, Paper prepared for the 38th Annual Meeting Jackson, Wyoming, USA, 20-24 May, 2007



Document No: IRG/WP/07-20351

THE INTERNATIONAL RESEARCH GROUP ON WOOD PRESERVATION

Section 2

Test Methodology and Assessment

A roadmap for performance-based specification of wooden components based on service life prediction

by

Christian Brischke & Andreas O. Rapp

Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Hamburg, Germany

Paper prepared for the 38th Annual Meeting

Jackson Lake Lodge, Wyoming, USA

20-24 May, 2007

IRG Secretariat
Box 5609
SE-114 86 Stockholm
Sweden

www.irg-wp.com

Brischke, C. and Rapp, A.O.

Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH),
Hamburg, Germany

Abstract

The need for an unified and harmonised system for performance classification and specification of wood and wood-based products in Europe emanates from requirements of users and the European Construction Products Directive, CPD. A road to a feasible specification system is outlined. Exposure-related performance prediction was worked out as a key task on the way to product specification. Therefore suitable tools, field test methods as well as short-term/laboratory test methods, are sought to allow the determination of reference service lives for different exposure categories. On one hand, performance factors, which derive from service lives in field tests, allow the specification of wood products. On the other hand, the calculation of inter-site factors may allow the modelling of service lives and the drawing of hazard mappings.

Keywords

Commodity, Construction Products Directive (CPD), factor method, field tests, performance factor, performance based building, reference service life (RSL).

8.1.1 Introduction

An unified and harmonised system for performance classification and specification of wood and wood-based products in Europe is still lacking. At the same time the need for such a system becomes more and more obvious. Users and customers have a strong interest in reliable information on the performance of wooden products to be expected. They are the decision makers on the market and will particularly decide, if wood-based products or other substitute building materials will be applied.

For the user the only valuable product information needs to base on performance characterisation. To determine the relative protective effectiveness of a wood preservative, as it is done according to different European standards, e.g. EN 113 (1996), ENV 807 (2001), is not very helpful for the user. For potential customers it is essential to assess the possibility that a product will meet his requirements (*i.e.* the desired service life). For this purpose ideally a reliable service life estimation is needed, but at least a product specification by means of performance classes. Furthermore, such a system should not be limited for a particular group of wood products only, but universally applicable for all wood-based products:

- (a) wood treated with classical wood preservatives
- (b) wood treated with new organic preservatives
- (c) natural durable wood
- (d) modified wood
- (e) wood-based composites.

Secondly, the need for performance classification emanates from the European Construction Products Directive, CPD (1988) on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the member states relating to construction products. The CPD requires in particular "products fit for an intended use", which can be translated as a sufficient performance over a certain time period – the time period of the intended use.

Thus, for the wood industry as well as for wood scientists two important requests derive from the CPD: 1. Deliver suitable test methods to assess the performance over time of wood-based products, and 2. Establish a Europe-wide harmonised classification and specification system.

The objectives of this work were to identify the necessary steps towards a feasible performance classification system and to provide a roadmap for the specification of wood-based products. The approach presented in the following should be seen as a proposal and a base for the discussion about different aspects related to wood product specification. Valuable comments and subjects

of the discussion, which took place during the London workshop of COST E37 on September 18th, 2006, were considered in this paper.

8.1.2 Roadmap for the specification of wood and wood-based products

General aspects

A roadmap for the specification of wood and wood-based products to be drawn in this paper can be defined by its start and ending point. The starting point of the road are the expectancies on a specification system by the user of wood-based products and the CPD (1988) as described in chapter 1. A feasible product specification itself is the final destination to end up with the road. From the beginning it is clear, that the end of this road can only be reached by performance prediction, which needs to be realized somehow (Figure 8.1-1). In the following the different stopovers on the roadmap will be described and discussed stepwise in separate chapters.

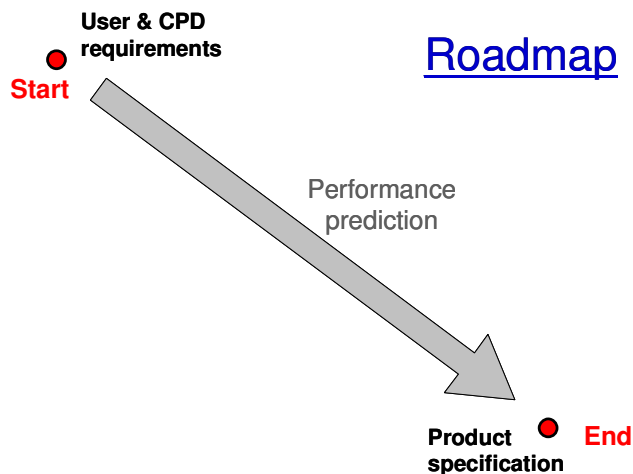


Figure 8.1-1. Start and ending point of a road towards the specification of wood and wood-based products.

Necessary number of reference service lives

To predict the performance of a wood-based product means nothing else than to predict its service life. The service life of a product ends, when the performance level becomes lower than the performance requirements, whether they are functional, static, or aesthetic. Therefore performance prediction can

be equated with service life prediction, and the principles of service life planning as given by the ISO standard 15686 should be considered. According to ISO 15686-1 (2000) a service life can be estimated by considering a reference service life and different modifying factors as follows:

Estimated service life (ESL) = Reference service life (RSL) • modifying factors,

whereby the modifying factors include all conditions, which deviate from defined reference conditions, e.g. climate, design measures, or maintenance intervals. From the laws of error propagation can be seen, that the more unknown variables are considered in an equation, the higher is the total statistical error to be expected. Therefore, it is obvious, that working with only one single RSL is no solution. Thus, the question occurs, how many different RSLs need to be considered for a reliable service life estimation, and how can these RSLs be determined (suitable test methods). Different wooden commodities, even if they are made from the same material, can perform very differently. Depending on the exposure situation different service lives will be obtained, e.g. for wooden poles in ground contact or the same material as beams in a roof construction. Table 8.1-1 shows, how commodities, exposure situations, and the performance to be expected can be related to each other.

Table 8.1-1. Different exposure categories with related use classes according to EN 335-1 (1992), commodities and possibly suitable test methods.

ID	Related to use class	Exposure category	Commodity group	Close to reality - Test method	
A	1	Interior	Roof beams, rafters	?	→ RSL
B	2	Above ground covered	External walls, ground floor joist	?	→ RSL
C	3.1	Above ground coated	Window joinery	L-joint EN 330	→ RSL
D	3.2 a	Above ground slight	Cladding, fence rails	?	→ RSL
E	3.2 b	Above ground severe	Decks	Double layer/ Multiple layer?	→ RSL
F	4	Ground contact	Poles, posts, sleepers	EN 252	→ RSL
G	5	Sea water contact	Ships, wharfs	EN 275	→ RSL
H		Termite hazard	-	?	→ RSL

Different commodities can be merged in commodity groups with respect to similar performance to be expected. At the same time different exposure categories can be defined and related to the different commodity groups. However, a simple equalisation of exposure and commodity is not possible, as for window joinery, which is usually coated, the same exposure situation is given compared to a cladding, but a completely different performance of these two commodities can be expected. In this case one needs to distinguish between coated and uncoated commodities within the same exposure category "above ground". A second example for the need of a more distinguished classification of commodity/exposure groups is the hazard of termite attack. This regionally occurring special hazard concerns nearly all commodities and requires therefore a separate category.

Some exposure categories are identical with the use classes after EN 335-1 (1992) and may be taken over. However, the range of use class 3 seems to be unacceptably wide and needs therefore to be subdivided. In Table 8.1-1 coated

and uncoated commodities are distinguished in first instance. Secondly, slight and severe hazards are distinguished for uncoated materials. The need for further differentiations should be discussed.

To summarize, the essential finding is that the agreement on a certain classification of exposure categories, which represent different commodities close to reality, gives the necessary number of RSLs to be considered for service life prediction. Hereby the rule should be to distinguish between as many categories as necessary, but as few as possible. Thus, the first stopover "Necessary exposure categories" is reached (Figure 8.1-2).

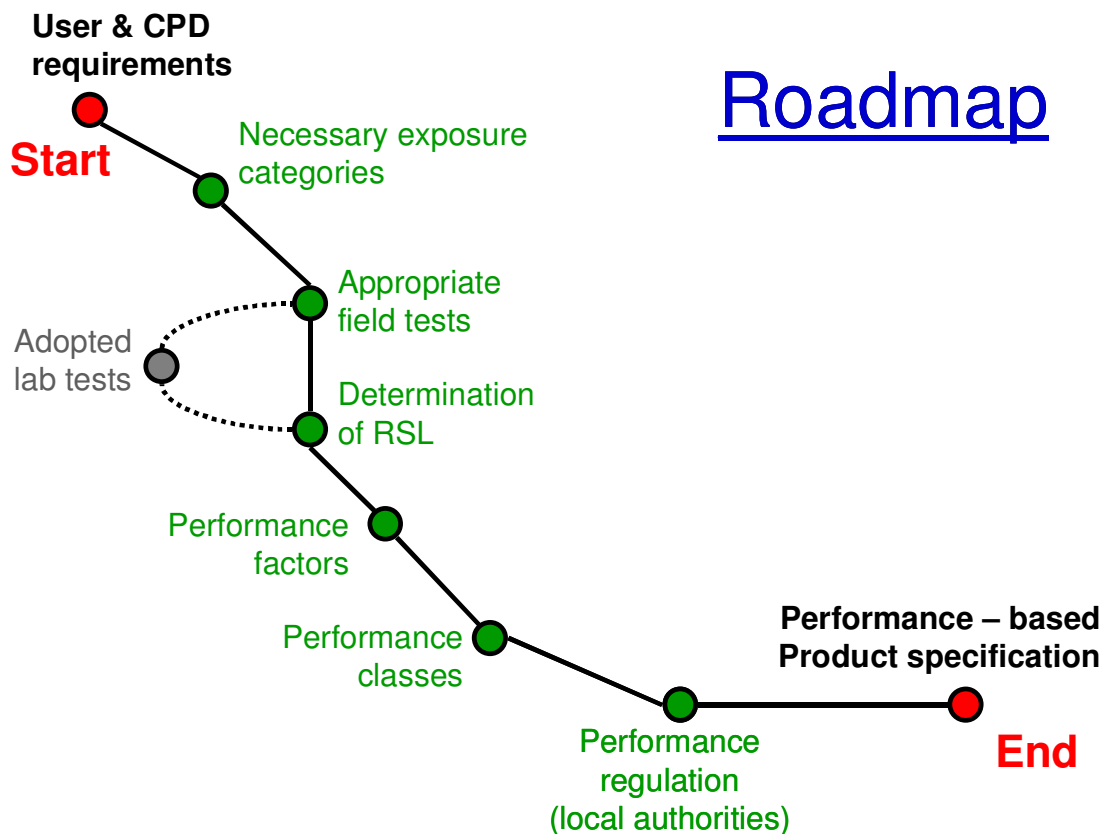


Figure 8.1-2. Roadmap for the specification of wood and wood-based products.

Determination of reference service lives with appropriate field test methods

Once a certain number of exposure categories is agreed on, the next task is to determine RSLs for all of them. Therefore, suitable test methods, which represent the different exposure categories, and commodity groups respectively, need to be figured out. Table 8.1-1 gives some examples for field

test methods, which may be helpful to determine RSLs for the particular categories. For example, the EN 252 (1989) test for in-ground exposure and the L-joint-test (EN 330, 1993) for coated window joinery are well established methods, and a lot experience with these tools exists.

For other exposure categories suitable tools are still missing and the adoption of existing methods or the development of new methods should be the next stopover on the map ("Appropriate field tests", Figure 8.1-2).

Determination of reference service lives with adopted laboratory tests

Appropriate test methods for the determination of RSLs are not necessarily only field test methods. Especially the wood industry, but also scientists and testing laboratories, are seeking for faster short-term methods, not at least to allow a sufficiently rapid approval of a product for certain applications. However, as a start, methods, which are as close to reality as possible, should be considered. These are in general and apart from in-service performance, field trials.

Some guidance, how to incorporate short-term tests into performance classification, is given by the ISO standard 15686-2 (2001). An extract of the systematic methodology for service life prediction of building components, adopted and closer related to wood products is given in the scheme of Figure 8.1-3.

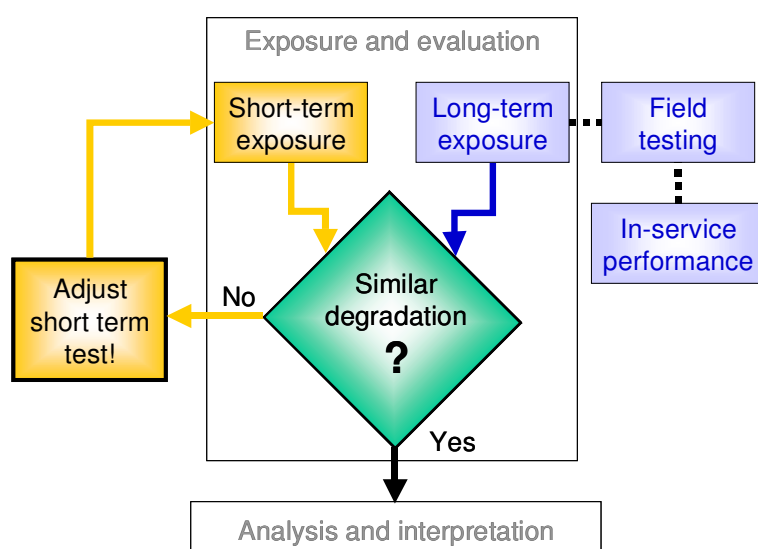


Figure 8.1-3. Systematic methodology for service life prediction of building components (according to: ISO 15686 -2 (2001)).

Whenever one wants to make use of short-term tests, it is indispensable to compare the degradation patterns between long-term and short-term tests. As long as no similar degradation pattern can be observed, the short-term test needs to be adopted. However, if similar degradation is provided, nothing argues against the inclusion of laboratory short-term tests. Quite the contrary, there are also some exposure categories conceivable, where short-term test appear as the only suitable solution: For commodities exposed above ground and covered, e.g. external walls, the occurrence of decay will probably take years or even decades. In this case, moisture measurements over a limited period of time may be an alternative to long-term field trials.

However the different test methods look like, for the roadmap it is essential that for every exposure category a method, close to reality, is agreed on to obtain a RSL for each category (Table 8.1-1), which is the next stopover ("Determination of RSL", Figure 8.1-2). The adoption of short-term test methods may be seen as a side way on the map.

Performance factors

The results of the different tests, representing the different exposure categories, can be used to predict and classify the performance of wood-based products. Actually, the primary result of every field trial is a service life in years, on the one hand the service life of a material X to be tested, on the other hand the service life of a reference material. The reference material can be Scots pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.), as it is used in many existing European standards, but may be also different for a particular test method.

NOTE: The service life of a reference material or reference product ($SL_{\text{reference}}$) is different from the reference service life (RSL) of a certain material X determined at a particular test site.

Thus, two main results arise from each field test:

$SL_{\text{material X}}$ = service life of a material X to be tested

$SL_{\text{reference}}$ = service life of the reference

To become independent from the influence of the different test sites it seems appropriate to express the performance of the test material as a factor, the performance factor (PF):

Performance factor PF:

$$PF = SL_{\text{material X}} / SL_{\text{reference}} \quad [y/y]$$

In accordance to the classification of exposure situations (Table 8.1-1) the performance factors must be related to the different exposure categories. For each exposure category a performance factor needs to be determined as the following example shows:

Exposure category F: ground contact

Test method: EN 252 (1989)

$$SL_{\text{material X}} = 6.9 \text{ years}$$

$$SL_{\text{reference}} = 3.0 \text{ years}$$

$$PF_F = SL_{\text{material X}} / SL_{\text{reference}} = 6.9/3.0 = 2.3$$

$PF_F = 2.3 \rightarrow 2.3$ longer service life than the reference in ground contact (exposure category F)

With the help of performance factors for each considered exposure category a very detailed and precise characterization for a material to be tested is possible. From the stopover "Performance factor" the final destination is already reachable on the roadmap. In principal, every material is specifiable with a certain number of performance factors.

Performance classes and performance regulation

The use of numerous different performance factors may cause confusion during its implementation in practice. Therefore it could be an option to combine performance factor intervals in performance classes, e.g. according to the classification of durability (EN 350, 1994), as schematically shown in Figure 8.1-4. Again the creation of performance classes needs to be done separately for the different exposure categories.

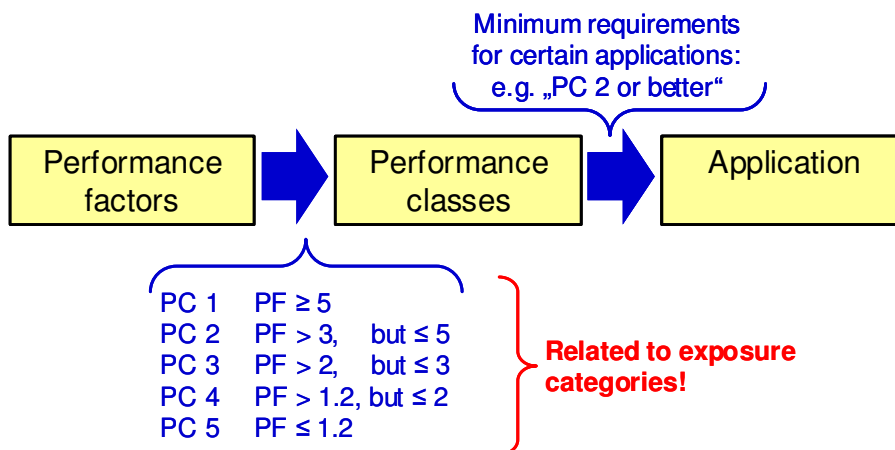


Figure 8.1-4. Relationship between performance factors, performance classes, and performance regulation.

To define, which product may be used for a certain application, is a task for the local authorities. They need to devise requirements related to the different performance classes (example given in Figure 8.1-4). On the roadmap the final destination is reached. The task "performance regulation" appears as a stopover on the road to a "performance-based product specification".

Test-site relationships

In the chapter "Performance factors" the influence of the test site was not considered, in fact performance factors were created in order to eliminate its influence. However, the test site has certainly a strong influence on the test results. Testing the same material at different field test sites will inevitably lead to different service lives. Table 8.1-2 gives a fictitious example of test results from L-joint tests (EN 330, 1993), which were carried out at three different test sites, *i.e.* London, Hamburg, and Bordeaux.

Table 8.1-2. Fictitious example for the calculation of performance factors from service lives of a material X to be tested and a reference material determined at different test sites.

Test site	SL _{material X}	SL _{reference}	PF _{3.2.a} (L-joint)
London	18 years	9 years	2.0
Hamburg	24 years	12 years	2.0
Bordeaux	30 years	15 years	2.0

The material X to be tested revealed different service lives at the three sites as well as the reference material. Ideally, the calculation of performance factors leads to the same performance classification (here: PF_{3.2.a} = 2.0) for all test sites. Certain variations of the performance factors determined at different sites should be expected, but may be in an acceptable range.

The relation between two test sites can be calculated from the service lives of the reference material in terms of an inter-site factor, e.g. between London and Bordeaux:

$$\text{Inter-site factor}_{\text{BDX/LON}} = \text{ISF}_{\text{BDX/LON}} = \frac{\text{SL}_{\text{reference}} / \text{LON}}{\text{SL}_{\text{reference}} / \text{BDX}} = 15 \text{ years} / 9 \text{ years} = 1.67$$

Another example shows a possible practical use of the knowledge about inter-site relationships:

Assumptions:

1. Material X shall be used in Bordeaux
2. Material X is so far tested only in London

Question:

What will be the estimated service life (ESL) of material X in Bordeaux?

With the help of the inter-site factor between London and Bordeaux the ESL of material X in Bordeaux can be calculated:

$$ESL_{\text{material X / BDx}} = SL_{\text{material X / LON}} \cdot ISF_{\text{BDx/LON}} = 18 \text{ years} \cdot 1.67 = 30 \text{ years}$$

To summarize, two important measures can be obtained as a result of different field tests at different test sites: 1.) The performance factor, which is the service life of a certain material relative to a reference and can be used to specify a product. 2.) Quasi as a by-product, inter-site factors, which describe the relation between different test-sites by means of their decay hazard and can be used for service life prediction models and hazard mappings.

For the roadmap a second sideway with the stopover "Inter-site factors" resulted from reflecting the inter-site relationships (Figure 8.1-2). Together with the tasks "product specification" and "performance regulation" it represents the basis for performance based building, which can be seen as a super ordinate aim, when working on performance prediction and product specification.

8.1.3 Conclusions

A strong need for performance classification derives from the user of wood and wood-based products on one hand, and is required by the CPD on the other hand. On the way to fulfil these requirements service life prediction can be seen as the link between "user wish" and a feasible "product specification". The results from service life prediction are always numbers in years and consequently satisfy the request of the user, whereas performance factors, determined for a sufficient number of different exposure categories, can represent the connection between use/hazard (classes) and durability (classes). The roadmap outlined in this paper shows, that all necessary tools for an exposure-related performance specification are in principal already available. Different field and laboratory tests partly need to be adopted to service-close test situations, but do already exist, as well as use classes and durability classes, which are adoptable to performance classes. The challenge for wood industry and wood science is to bring all these single elements together – one proposal is made in the paper at hand. Finally, the cornerstones for a performance based building can be established on the way to a feasible products specification.

8.1.4 References

- Council of the European Communities (1988). Council directive of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the member states relating to construction products. 89/106/EEC, Brussels, Belgium.
- European Committee for Standardization (1990). EN 252. Wood preservatives. Field test methods for determining the relative protective effectiveness in ground contact.
- European Committee for Standardization (1992). EN 335-1. Hazard classes of wood and wood-based products against biological attack. Classification of hazard classes.
- European Committee for Standardization (1992). EN 335-2. Hazard classes of wood and wood-based products against biological attack. Guide to the application of hazard classes to solid wood.
- European Committee for Standardization (1994). EN 350-1. Durability of wood and wood-based products. Part 1: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood.
- European Committee for Standardization (1994) EN 350-2. Durability of wood and wood-based products. Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe.
- European Committee for Standardization (1997). EN 113. Wood preservatives. Test method for determining the protective effectiveness against wood-destroying basidiomycetes. Determination of toxic values.
- International Standardisation Organisation (2000). ISO 15686-1. Building and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles.
- International Standardisation Organisation (2001). ISO 15686-2. Building and constructed assets – Service life planning – Part 2: Service life prediction procedures.

9 ANHANG

Geographische Koordinaten der Freilandversuchsstandorte

Tab. 17. Geographische Koordinaten der Freilandversuchsstandorte.

Standort und Exposition	geographische Breite	Geographische Länge
Hamburg Sonne	53°30'18" N	10°12'04" E
Hamburg Schatten	53°30'18" N	10°12'04" E
Gewächshaus	53°30'18" N	10°11'58" E
Gewächshaus Winter	53°30'18" N	10°11'58" E
Reulbach Sonne	50°30'92" N	9°58'17" E
Reulbach Schatten	50°30'92" N	9°58'17" E
Stuttgart Sonne	48°44'31" N	9°05'92" E
Stuttgart Schatten	48°44'31" N	9°05'92" E
Freiburg Sonne	47°58'50" N	7°50'54" E
Freiburg Schatten	47°58'50" N	7°50'54" E
Oberrottweil	48°05'43" N	7°38'14" E
Feldberg	47°52'47" N	8°00'22" E
Bühlertal	48°40'48" N	8°10'79" E
Hornisgrinde	48°36'63" N	8°12'08" E
Hinterzarten	47°53'95" N	8°06'35" E
Schömburg	48°47'13" N	8°38'69" E
Heilbronn	49°08'65" N	9°14'00" E
Heidelberg	49°25'17" N	8°39'93" E
Dobel	48°47'82" N	8°29'52" E
St. Märgen	48°00'55" N	8°05'81" E
Uppsala	59°48'56" N	17°39'65" E
Ljubljana	46°03'93" N	14°30'74" E
Zagreb	45°49'26" N	16°02'03" E
London	51°24'35" N	0°38'22" W
Garston	51°42'09" N	0°22'60" W
Portsmouth	50°47'65" N	1°01'80" W
Ghent	51°02'57" N	3°42'41" E
Bordeaux	44°52'20" N	0°34'41" W
Oslo	59°56'40" N	10°42'41" E

Persönliche Publikationen in chronologischer Reihenfolge

- Brischke C (2003) Untersuchung der Eignung von Tannenholz für die thermische Modifikation. Diplomarbeit, Universität Hamburg, Hamburg
- Brischke C, Rapp AO (2004) Investigation of the suitability of silver fir (*Abies alba* Mill.) for thermal modification. Document No. IRG/WP 04-10457. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Brischke C, Rapp AO (2004) Istraživanje pogodnosti jelovine (*Abies alba* Mill.) za ekološku zaštitu drva termalnom modifikacijom. In: Jambreković V (Ed.) Drvougraditeljstvu – Racionalna uporaba drva. Sveuciliste u Zagrebu - Sumarski Fakultet: 67-74
- Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO (2004) A new method for testing the abrasion resistance of thermally modified wood. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Reinbek, Germany
- Rapp AO, Brischke C (2004) The influence of macro and micro climate on decay. *Proceedings of COST E22 Final workshop*, Estoril, Portugal
- Welzbacher CR, Rapp AO, Brischke C (2004) Arten und Eigenschaften von Thermoholz. In: *Bauen im Bestand – mit Holz, Beiträge zum 4. Holzbauforum*. Huss-Medien GmbH, Berlin: 138-163
- Augusta U, Rapp AO, Welzbacher CR, Brischke C (2005) Dauerhaftigkeit heimischer Holzarten in verschiedenen Gebrauchsklassen ohne und mit Imprägnierung durch Öle. In: *Holzhaus-Bauweisen im Vergleich und Neues vom Holzschutz, Beiträge zum 5. Holzbauforum*. Huss-Medien GmbH, Berlin: 82-104
- Brischke C, Englund F (2005) Service Life Prediction methods – Outcome of TFPC questionnaire. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Oslo, Norway
- Brischke C, Koch S, Rapp AO, Welzbacher CR (2005) Surface properties of thermally treated wood – Wear, abrasion and hardness. In: Militz H, Hill C (Eds.) Wood modification: Processes, properties and commercialisation. *Proceedings of the 2nd European Conference on Wood Modification*: 371-375

-
- Brischke C, Rapp AO (2005) Istraživanje utjecaja makro I mikro klime – Eksperimentalni pristup predviđanju životnog vijeka drvnih komponenata I preliminarni rezultati. In: Jambrečković V (Ed.) Drvo u graditeljstvu – Postojanost I kakvoća građevnih proizvoda od drva. Sveučiliste u Zagrebu - Sumarski Fakultet: 1-8
- Brischke C, Rapp AO (2005) Experimental approach for service life prediction of wooden materials. TT6-198. *Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France
- Brischke C, Rapp AO (2005) Relation between lab tests, field tests, and in-service performance and their contribution to SLP. *Proceedings of COST E37 Workshop*, Oslo, Norway
- Rapp AO, Berninghausen C, Bollmus S, Brischke C, Frick T, Haas T, Sailer M, Welzbacher CR (2005) Hydrophobierung von Holz – Erfahrungen nach 7 Jahren Freilandtests. *Beiträge der 24. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 157-169
- Rapp AO, Brischke C (2005) Field test design for service life prediction of wooden components. Document No. IRG/WP 05-20308. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO (2006) Detection of fungal decay by high-energy multiple impact (HEMI) testing. *Holzforschung* 60: 217-222
- Kartal SN, Brischke C, Rapp AO, Imamura Y (2006) Biological effectiveness of didecyl dimethyl ammonium tetrafluoroborate (DBF) against Basidiomycetes following preconditioning in soil bed tests. *Wood Science and Technology* 40: 63-71
- Rapp AO, Brischke C, Welzbacher CR (2005) Interrelationship between the severity of heat treatments and sieve fractions after impact ball milling: a mechanical test for quality control of thermally modified wood. *Holzforschung* 60: 64-70
- Brischke C, Rapp AO (2006) A roadmap for the specification of wood and wood-based products in Europe - User requirements, performance classification, and service life estimation. *Proceedings of COST E37 Workshop*, London, United Kingdom

- Brischke C, Rapp AO (2006) Normung und Standardisierung von thermisch modifiziertem Holz (TMT) – Prüfnormen mit Bezug auf die Bestimmung der Dauerhaftigkeit, der Eignung der Abschätzung der Lebensdauer und die Bestimmung der Vergütungsintensität von thermisch modifiziertem Holz (TMT). In: Normung und Standardisierung von thermisch modifizierten Holz (TMT) – Abschlussbericht 2006, Deutsches Institut für Normung DIN, Köln
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R (2006) Decay influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science and Engineering* 1: 91-107
- Brischke C, Rapp AO, Welzbacher CR, (2006) High-energy multiple impact (HEMI)-test – Part 1: A new tool for quality control of thermally modified timber. Document No. IRG/WP 06-20346. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO, Bollmus S (2006) Biozidfreier Holzschutz mit Ölen und Wachsen – Erfahrungen aus sieben Jahren Freilandversuchen zum Feuchteschutz durch Hydrophobierung. *Holz-Zentralblatt* 132: 206, 208
- Hasan M, Despot R, Rapp AO, Brischke C, Welzbacher CR (2006) Some physical and mechanical properties of wood sterilised by gamma radiation. In: Kurjatko S, Kúdela J, Lagaña R (Eds.) Wood Structure and Properties '06. Arbora Publishers, Zvolen: 239-244
- Kartal SN, Brischke C, Rapp AO, Imamura Y (2006) Biological resistance of didecyl dimethyl ammonium tetrafluoroborate (DBF)-treated wood in soil-bed and Basidiomycetes tests. Document No. IRG/WP 06-30393. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Welzbacher CR, Brischke C, Rapp AO (2006) High-energy multiple impact (HEMI)-test – Part 2: A mechanical test for the detection of fungal decay. Document No. IRG/WP 06-20339. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden

-
- Brischke C, Rapp AO (2007) Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufes an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Holzbiologie und Holzschutz, Hamburg: Arbeitsbericht Nr. 2007/2
- Brischke C, Rapp AO (2007) A roadmap for performance-based specification of wooden components based on service life prediction. Document No. IRG/WP07-20351. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Sweden
- Brischke C, Rapp AO (2007) Lebensdauervorhersage und Klassifizierung von Holzprodukten – Stand der Diskussion. *Beiträge der 25. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 29-46
- Brischke C, Welzbacher CR, Brandt K, Rapp AO (2007) Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE L*a*b* color data on homogenized wood samples. *Holzforschung* 61: 19-22
- Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO, Augusta U (2007) Dauerhaftigkeit heimischer Holzarten in verschiedenen Gebrauchsklassen & Feuchteschutz durch Hydrophobierung mit vegetabilen Ölen. *Beiträge der 13. Quedlinburger Holzbautagung*, Fachverband Holzbau und Holzschutz Sachsen-Anhalt, Quedlinburg, Germany
- Despot R, Hasan M, Brischke C, Welzbacher CR, Rapp AO (2007) Changes in physical, mechanical and chemical properties of wood during sterilization by gamma irradiation. *Holzforschung* 61: 267-271
- Hofer S, Welzbacher, CR, Rapp AO, Brischke C (2007) Erfahrungen mit Thermoholz (TMT) im Fassaden- und Gartenbereich. *Beiträge der 25. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 143-162
- Råberg U, Brischke C, Rapp AO, Högberg NOS, Land CJ (2007) External and internal fungal flora of pine sapwood (*Pinus sylvestris* L.) specimens in above-ground field tests at six different sites in south-west Germany. *Holzforschung* 61: 104-111
- Rapp AO, Augusta U, Brischke C, Welzbacher CR (2007) Dauerhaftigkeit heimischer Hölzer unter bautypischen Bedingungen. *Beiträge der 25. Holzschutz-Tagung der DGfH*, DGfH, München: 7-20

- Rapp AO, Brischke C, Welzbacher CR (2007) The influence of different soil substrates on the service life of Scots pine sapwood and oak heartwood in ground contact. *Wood Material Science and Engineering*. Published online. DOI: 10.1080/17480270701273015
- Welzbacher CR, Brischke C, Rapp AO (2007) Influence of treatment temperature and duration on selected biological, mechanical, physical, and optical properties of thermally modified timber (TMT). *Wood Material Science and Engineering*. Published online.
DOI: 10.1080/1748027070270701267504
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R (2007) Measurement system for long-term moisture recording with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.002
- Brischke C, Rapp AO, Bayerbach R, Morsing N, Fynholm P, Welzbacher CR (2007) Monitoring the "material climate" of wood to predict the potential for decay: Results from in-situ measurements on buildings. *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.001
- Brischke C, Rapp AO (2007) Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field - Observations in different microclimates. *Wood Science and Technology*: Submitted for publication
- Brischke C, Rapp AO (2007) Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature, and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Science and Technology*: Submitted for publication
- Welzbacher CR, Jazayeri L, Brischke C, Rapp AO (2007) Examination of the reasons for the increased biological durability of thermally modified spruce (*Picea abies* Karst.). *Wood Research*: Submitted for publication

ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich erkläre, dass ich mich weder an einer anderen Universität um eine Promotion beworben, noch die Dissertation an einer anderen Universität eingereicht habe.

Hamburg, Oktober 2007

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Christian Brischke', written in a cursive style.

Christian Brischke