

Holzqualität und Eigenschaften des
juvenilen und adulten Holzes der Douglasie
(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco)
aus süddeutschen Anbaugebieten

Dissertation

Zur Erlangung der Würde des
Doktors der Naturwissenschaften
des Fachbereiches Biologie der Universität Hamburg

jan-henning blohm

Hamburg, 2015

Genehmigt vom Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
an der Universität Hamburg
auf Antrag von Herrn Prof. Dr. Jörg. B. Ressel
Weiterer Gutachter der Dissertation: Herr PD Dr. habil. Gerald Koch
Tag der Disputation: 17. Juli 2015

Für meine Mutter

I'n'i give thanks for life, health and strength.

Heartical thanks to all the people from Thünen Institute, Hamburg University or any other affiliation, whether we worked, or just spent some time together. We cannot know who was playing the key stone, so... THANK YOU AND YOU AND YOU! The past three years was a mostly enjoyable time with lots of developments, of which the friendly and familiar atmosphere will always be reminded.



Speziell danke ich Prof. Dr. Bodo Saake, Prof. Dr. Jörg B. Ressel (das war ein toller Sprung auf den fahrenden Zug!), Priv. Doz. Dr. habil. Gerald Koch und Dr. Dr. h.c. Uwe Schmitt für die Betreuung und Begutachtung meiner Arbeit. Einerseits weiß ich die mir gewährte Freiheit zu schätzen, andererseits konnte ich die brennenden Hütten nach Gesprächen wieder mit ruhigen Augen sehen. Herzlichen Dank!!!

@ Laura, @ Matthias: süper-thanks! Bei euch wusste die Arbeiten immer wie z.Hd. myself.

Vielen Dank für Diskussionen und die Weitergabe von Wissen an all die „Ruheständler“: insbesondere Prof. (em.) Dr. Dr. h.c. mult. Walter Liese, Prof. (i.R.) Dr. Josef Bauch, Prof. (i.R.) Dr. Dieter Eckstein, Prof. (i.R.) Dr. Olaf Schmidt, und Dr. Hans-Georg Richter. Es war sehr wichtig, zu hören, was früher alles schon (nicht) ging.

Vielen Dank an Sigrid Wrobel für die Unterstützung beim Strecken, Dämpfen und Verschieben von Jahrringkurven.

Dankeschön an Anna Knöpfle für HPLC-Arbeiten und Anleitung im schwierigen Umgang mit dem ASE-Automaten – meine Nerven....

Für Unterstützung bei der normgerechten Zerstörung von Holz bedanke ich mich bei Dörte Bielenberg. Das hat Spaß gemacht! Außerdem vielen Dank an Dr. Johannes Welling für Beratung und Hilfe zu Prüfungen und Trocknung.

Viel hatte ich mit den ‚Pilzen‘ (wenn ich das Wort doch schreibe, dann wenigstens in ‚) zu tun: für Anleitung, Hilfe und Diskussionsbereitschaft danke ich Marie Therese Lenz und Dr. Eckhard Melcher. Besonders für die Excel Tipps und die Präsentation unserer Ergebnisse auf Konferenzen! Danke!!!

Auf dem Feld der Elektronenmikroskopie haben Daniela Paul und Tanja Potsch mir viel geholfen. Dafür, für das gemeinsame Betreiben eines Wasserkochers und Verständnis für die inadäquate Beschallung meines Büros: vielen, vielen Dank!

Dr. Robert Evans hat mit seinem SilviScan wertvolle Ergebnisse geliefert. Thanks therefore Rob!

Christina Waitkus danke ich sehr für die professionellen Foto- und Bildarbeiten. Cheese!

Ein Dank an Stefanie Warsow für den Einschnitt von Proben und insbesondere das Ertragen der Lagerung meiner Proben mitten in der Werkstatt.

Für die kontinuierliche und rasche Beschaffung und Bereitstellung von Lektüre geht ein großer Dank an Astrid Stilke und Ulrike Reupke in der Bibliothek.

Gedankt sei unseren Projektpartnern von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA): Dr. Franka Brüchert, Prof. Dr. Ulrich Kohnle, Dr. Udo Hans Sauter, Andreas Ehring und Muhidin Šeho – das Holz, wichtige Information und schließlich auch eine Delegation kamen gut an.

Das Projekt ‚Charakterisierung und Identifizierung von juvenilem und adultem Kernholz‘ wurde durch die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) gefördert (Nr. 22037111). Auch dafür: danke!

„Danken... möcht‘ ich meinen Tanten und Verwandten... all meinen Bekannten... die hinter mir standen [...]“ [ADVANCED CHEMISTRY (1996): Chemischer Niederschlag. Auf: Advanced Chemistry. Heidelberg, 360° Records.]

Inhalt

1	Ziel der Arbeit	9
2	Stand des Wissens.....	10
2.1	Forstliche Hintergründe	10
2.2	Das Holz der Douglasie	14
2.3	Definition des juvenilen und adulten Holzes	16
3	Material und Methoden	21
3.1	Material	21
3.1.1	Douglasienholz aus dem Standraumversuch in Baden-Württemberg	21
3.1.2	Älteres Douglasienholz	25
3.1.3	Untersuchte Bereiche	26
3.2	Untersuchungsmethoden	29
3.2.1	Bestimmung der Jahrringbreite	29
3.2.2	Bestimmung des Spätholzanteils.....	30
3.2.3	SilviScan-3-Untersuchungen.....	30
3.2.3.1	Bestimmung der lokalen radialen und tangentialen Tracheidendurchmesser	30
3.2.3.2	Bestimmung der lokalen Rohdichte	31
3.2.3.3	Bestimmung des lokalen Mikrofibrillenwinkels.....	31
3.2.3.4	Berechnung der lokalen Tracheidenwanddicke	32
3.2.3.5	Berechnung des lokalen Elastizitätsmoduls.....	33
3.2.4	Bestimmung der Tracheidenlänge.....	33
3.2.5	Bestimmung der Druckfestigkeit und des Druck-Elastizitätsmoduls	34
3.2.6	Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls	36
3.2.7	Bestimmung der Bruchschlagarbeit	37
3.2.8	Bruchflächencharakterisierung.....	37
3.2.9	Bestimmung der Quellung	38
3.2.10	Laborprüfungen zur natürlichen Dauerhaftigkeit.....	39
3.2.11	Verkürzte Prüfung zur natürlichen Dauerhaftigkeit.....	45
3.2.12	Bestimmung des Extraktstoffgehaltes.....	47
3.2.13	Bestimmung des Taxifolgehaltes	50
3.2.14	<i>In-situ</i> Studien von Basidiomycetenaktivität	51
3.2.15	Zelluläre UV-Vis-Mikrospektrophotometrie	53
3.2.16	Identifizierung juvenilen und adulten Holzes	55
3.3	Statistik.....	57
4	Ergebnisse und Diskussion	63
4.1	Anatomische Eigenschaften	63
4.1.1	Jahrringbreite.....	63

Inhalt

4.1.2	Spätholzanteil	66
4.1.3	Tracheidenlänge	70
4.1.4	Tracheidenwanddicke.....	74
4.1.5	Tracheidendurchmesser.....	76
4.1.6	Mikrofibrillenwinkel	78
4.2	Ausgewählte physikalische und mechanische Eigenschaften.....	81
4.2.1	Rohdichte	81
4.2.2	Druckfestigkeit und Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faser.....	85
4.2.3	Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul	88
4.2.4	Bruchschlagarbeit.....	95
4.2.5	Quellung.....	97
4.3	Biochemische Eigenschaften	101
4.3.1	Natürliche Dauerhaftigkeit	101
4.3.2	Extraktstoffgehalt abgebauter Proben und Kontrollen	107
4.3.3	Taxifolingehalt abgebauter Proben und Kontrollen	109
4.3.4	Ligninkonzentration abgebauter Proben und Kontrollen	109
4.3.5	Elektronenmikroskopische Charakterisierung des Holzabbaus.....	113
5	Konklusion	114
6	Zusammenfassung	118
7	Abstract.....	120
8	Literaturverzeichnis.....	122
9	Annex.....	138
10	Abbildungsverzeichnis	145
11	Tabellenverzeichnis.....	151

Abkürzungen

BHD	Brusthöhendurchmesser
BHD 40	Wuchsmodell Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser von etwa 40 cm
BWI	Bundeswaldinventur
CEN	European Committee for Standardization
<i>Cp</i>	<i>Coniophora puteana</i> (Schumacher ex Fries), Karsten
<i>Cv</i>	<i>Coriolus versicolor</i> Linneus, Quélet
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
<i>Gt</i>	<i>Gloeophyllum trabeum</i> (Persoon ex Fries), Murrill
HPLC	high performance liquid chromatography, Hochleistungsflüssigchromatographie
ISO	International Organization for Standardization
JR	Jahrring
JRB	Jahrringbreite
kA	kambiales Alter
L	Wuchsmodell langsam gewachsene Bäume
LS	Wuchsmodell erst langsam, dann schnell gewachsene Bäume
o.R.	ohne Rinde
<i>Pp</i>	<i>Poria placenta</i> (Fries), Cooke sensu J. Eriksson
r.L.	relative Luftfeuchtigkeit
S	Wuchsmodell schnell gewachsene Bäume
SL	Wuchsmodell erst schnell, dann langsam gewachsene Bäume
S2	Sekundärwand 2
TS	Technical Specification
UV	Ultraviolettstrahlung

1 Ziel der Arbeit

Die im nordwestlichen Amerika beheimatete und wirtschaftlich bedeutende Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) wurde Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland eingeführt, um sie als forstliche Alternative mit besonders hohen Zuwachsleistungen zu etablieren. Heute wird der Douglasie vor dem Hintergrund der für Mitteleuropa prognostizierten Klimaerwärmung im Vergleich zur heimischen Fichte (*Picea abies* (L.) H. Karst) eine höhere Toleranz gegenüber ausgedehnten sommerlichen Trockenphasen zugesprochen (BÄR 2009b, KÖLLING 2008). Der Vergleich von Douglasie und Fichte verlangt neben der forstlichen Charakterisierung auch eine detaillierte interdisziplinäre Untersuchung des Holzes hierzulande gewachsener Douglasie, die bisher überwiegend hinsichtlich der technologischen Eigenschaften untersucht wurde. Der Großteil deutscher Douglasien aus wirtschaftlichem Anbau hat noch nicht das Ende der mit 80 bis 120 Jahren angesetzten Umtriebszeit erreicht. Voraussetzungen zur Optimierung der Bestandesbehandlung und vor allem der daraus abgeleiteten Wertschöpfung sind umfangreiche Kenntnisse der Eigenschaften und Qualität des Kernholzes einschließlich der Unterscheidung zwischen juvenilem und adultem Holz.

Die Untersuchungen haben daher das Ziel, die anatomischen, physikalischen, mechanischen und biochemischen Eigenschaften des juvenilen und adulten Holzes von Douglasien aus süddeutschen Anbauten zu ermitteln und diese qualitativ zu bewerten.

Für viele Verwendungszwecke wird ausschließlich das Kernholz genutzt, weshalb gezielt Unterschiede zwischen juvenilem und adultem Kernholz untersucht werden. Hierbei sind zwei unterschiedliche Phänomene zu berücksichtigen: die kambiale Alterung einerseits und andererseits die einige Zeit später einsetzende Verkernung. Während Kern- und Splintholz anhand des dunkleren Farbkerns klar voneinander abzugrenzen sind, bedarf es geeigneter Merkmale zur Identifizierung des juvenilen und adulten Holzes. Anhand der vier Merkmale Spätholzanteil, Tracheidenwanddicke, Mikrofibrillenwinkel und Rohdichte wird das juvenile und adulte Holz der untersuchten Bäume grundlegend identifiziert. Hieraus folgen die Quantifizierung sowie die anatomische, physikalische, mechanische und biochemische Charakterisierung des Holzes. Die Ästigkeit als ein wichtiges qualitätsbestimmendes Merkmal von Douglasienholz wird von den Untersuchungen ausgenommen. Information hierzu liefern zeitgleich laufende Untersuchungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg in Freiburg. Das zur Untersuchung ausgewählte Holz deckt das gesamte Spektrum waldbaulich zu rechtfertigender Bestandeskonstellationen ab und ist somit besonders aussagekräftig.

2 Stand des Wissens

Die Herkunft der Douglasie, die aktuelle Bedeutung und Diskussion des Anbaus in Deutschland und eine kurze Beschreibung der Holzeigenschaften führen in den Themenkreis ein. Zudem werden Eigenschaften juvenilen und adulten Holzes dargestellt und definiert.

2.1 Forstliche Hintergründe

Die Douglasie ist ein in der Jugend schattenresistenter, im Alter lichtliebender schnellwüchsiger, immergrüner Nadelbaum. In ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet erreicht die Douglasie Wuchshöhen bis zu 100 m; die nach Europa eingeführte Douglasie gehört mit Höhen von 50 bis zu 60 m zu den höchsten Bäumen Europas (STINGLWAGNER et al. 2009, SCHÜTT 2002). Eine anpassungsfähige Herzwurzel verankert die Douglasie auf wenig frischen bis frischen, tiefgründigen, lehmig-humosen und nicht zu steinigten Standorten und befriedigt die als durchschnittlich bewerteten Nährstoffansprüche. Dabei bevorzugt die Douglasie nicht unbedingt kalkreiche, doch eher saure Böden (KNOERZER 1999). Die Douglasie erträgt längere Trockenphasen, gedeiht jedoch am besten in regenreichem, luftfeuchten Klima in Höhenlagen bis zu 1500 m (FERRON 2010, STINGLWAGNER et al. 2009). Im Vergleich zur Fichte zeigt die Douglasie kein niedrigeres Sturmwurfisiko, versauert jedoch den Boden weniger (ALBRECHT et al. 2011, KNOERZER 1999). Die Eigenschaft der Douglasie, (tote) Äste bis zu 100 Jahren zu halten, erfordert zur Erziehung astreinen Holzes eine früh einsetzende, kontinuierliche Ästung (PAUL 1963). Dabei kann die Douglasie 500 bis 700 Jahre alt werden und Stammdurchmesser bis zu 2 m erreichen (STINGLWAGNER et al. 2009). Innerhalb der Gattung Douglasien (*Pseudotsuga*) unterscheidet die International Union for Conservation of Nature (IUCN) zwischen den vier Arten

- *P. menziesii*, (Nordwestamerika, ungefährdet)
- *P. macrocarpa* (Kalifornien, potentiell gefährdet),
- *P. japonica* (Japan, gefährdet) und
- *P. sinensis* (China, gefährdet).

Im Folgenden bezieht sich die Bezeichnung ‚Douglasie‘ auf die Art *P. menziesii*. Das nordwestamerikanische Verbreitungsgebiet ähnelt einem kopfstehenden ‚V‘, dessen einer Schenkel der Pazifikküste entspricht, der andere Schenkel wird durch die Rocky Mountains abgebildet. Die Nord-Süd-Ausdehnung des Douglasiengebietes reicht von Süd-Kanada (55 ° nördliche Breite) bis Nord-Mexiko (20 ° n. Br., vereinzelt). Standorte mit überwiegender Douglasienanteil beschränken sich auf Washington, Oregon und Kalifornien (HERMANN & LAVENDER 1990) sowie die kanadische Provinz British Columbia. In diesen US-Bundesstaaten liegt der Douglasienanteil auf der Hälfte der Waldfläche bei über 80 % (KRAMER & SMITH 1985) – vergesellschaftet mit beispielsweise *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg., *Abies grandis* (Dougl.) Lindl., *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl. und

Pinus lambertiana Dougl.. Zusätzliche Vorkommen sind die Mischwälder von Idaho, Montana, Wyoming und Alberta. Angelehnt an den West- und Ostrand der Verbreitung wird unterschieden zwischen der Grünen oder Küstendouglasie und der Grauen bzw. Blauen oder Inlands- bzw. Gebirgsdouglasie, die mit den Varietäten *P. menziesii* var. *menziesii/viridis* und var. *glauca* bezeichnet werden (HERMANN & LAVENDER 1990). Letztgenannte ist nicht mit der als Übergangsform postulierten Varietät var. *caesia* zu verwechseln (SCHWERIN 1907).

In ihrem Verbreitungsgebiet ist die Douglasie einer der wichtigsten Bäume für die Forst- und Holzwirtschaft (LANGUM et al. 2009). Gleichzeitig ist sie ein regionales Identifikationssymbol beispielsweise für die Unabhängigkeitsbewegung in den Kaskaden, deren Flagge eine Douglasie ziert. Zum diskutierten Gebiet eines potentiellen Staates ‚Cascadia‘ zählen neben British Columbia die US-Bundesstaaten Oregon und Washington; hier stellt die Douglasie fast die Hälfte der stehenden Holzvorräte, während ihr Anteil an der Waldfläche der Wuchsgebiete Pazifikküste bzw. Rocky Mountains 10 % bzw. 13 % beträgt. Als Rangfolge ausgedrückt hält die Douglasie die jeweils zweit- bzw. dritthöchsten Anteile an der Waldfläche (OSWALT et al. 2014). Zwar gleichen sich die Flächenanteile der Wuchsgebiete, doch besteht ein großer Unterschied zwischen dem Anteil gepflanzter Bestände: beträgt er an der Pazifikküste 54 %, so liegt er in den Rocky Mountains bei nur 0,5 %. Das Anpflanzen von zunächst als *second-growth* zu bezeichnenden Beständen resultiert aus dem Rückgang sogenannter *old-growth* Bestände von Anteilen um 60 % zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf etwa 20 % (FRANKLIN & SPIES 1983), allerdings liegt keine Information zur Änderung der Bezugs-Gesamtfläche vor. Die Old-Growth Definition Task Group (1986) definiert Bestände als *old-growth*, wenn eine Zahl von 6 bis 8 Bäumen pro acre (0,404686 ha) entweder Brusthöhendurchmesser von 30 bis 32 inch (76 bis 81 cm) oder ein Alter von mehr als 200 Jahren erreicht hat. Anhand des Alterskriteriums beläuft sich der Waldflächenanteil von *old-growth* Beständen auf heute 8 % an der Pazifikküste, 6 % in den Rocky Mountains und insgesamt 7 % im Verbreitungsgebiet der Douglasie (OSWALT et al. 2014). Die Einführung der amerikanischen Douglasie nach Europa gründete sich auf der relativen Koniferenarmut nach der letzten Eiszeit, während der die Douglasie aus Europa verschwand (PECHMANN 1963). Insbesondere der Wunsch der Forstwirtschaft, eine schnellwüchsige Konifere zu etablieren, führte um das Jahr 1830 zum Import von Douglasiensaat, und nach anfänglichen Anbauversuchen in Parks und Gärten ist die Douglasie heute einer der wichtigsten Forstbäume mit Migrationshintergrund (GROSSER & TEETZ 1998). Dabei setzt die Forstwirtschaft in Europa ausschließlich auf die Küstendouglasie (HERMANN & LAVENDER 1999), da diese Varietät im Gegensatz zur Inlandsdouglasie gegen die Douglasienschütte (*Rhabdocline pseudotsugae* Syd.) weitestgehend resistent ist (LIESE 1936).

Tabelle 1 gibt die mit Douglasien bestandenen Flächen europäischer Staaten wieder; demnach wachsen in Frankreich absolut betrachtet die größten Bestände, gefolgt von Deutschland, dem Vereinigten Königreich, den Niederlanden, Rumänien und Belgien. Am Beispiel der Region Wallonien zeigt sich die Dynamik des Douglasienanbaus: 1983 gab es in Wallonien 11.000 ha

Douglasienbestände (0,7 % der Fläche) – 20 Jahre später stockten bereits 23.400 ha (1,4 % der Landesfläche), wobei sich der Anbau in Belgien auf diese Region konzentriert (BIÉVELET et al. 2007). Europäische Staaten mit geringem Douglasienaufkommen (< 10.000 ha) sind Italien, Irland, Portugal, Spanien, Tschechien, die Gemeinschaft unabhängiger Staaten, Dänemark, die Slowakei, Polen, Ungarn und Österreich.

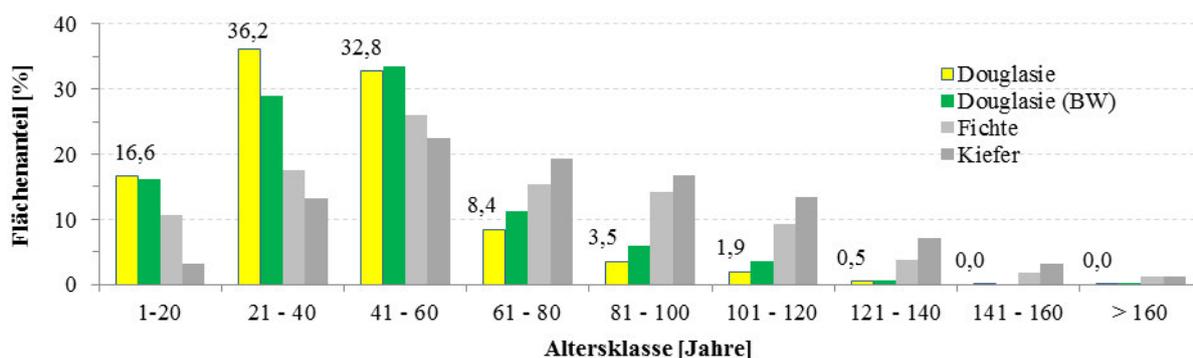
Tabelle 1 Übersicht der mit Douglasien bestandenen Flächen [ha] europäischer Gebiete.
^b Inventurdaten, ^s Schätzung, * zitiert aus HERMANN & LAVENDER (1999).

	Fläche [ha]		Jahr	Quelle
Frankreich	220.000	^b	1984	Bouchon (1984)*
	330.000	^b	1997	Champs (1997)*
	400.000	^b	2010	FERRON (2010)
Deutschland	134.000	^b	1986	HAPLA (1997); Braun & Weissleder (1986)*
	180.000	^b	2002	SCHMITZ et al. (2004)
	214.000	^b	2008	POLLEY et al. (2009)
	217.000	^b	2012	THÜNEN INSTITUT (2014)
- Rheinland-Pfalz	51.700	^b	2012	THÜNEN INSTITUT (2014)
- Baden-Württemberg	44.000	^b	2012	THÜNEN INSTITUT (2014)
Vereinigtes Königreich	47.000	^b	1982	Locke (1987)*
Niederlande	16.000	^b	1990	deVries (1990)*
Romänien	13.000	^b	1993	Enescu (1993)*
Belgien	12.000	^s	1993	Nanson (1993)*
- Wallonien	11.000	^b	1983	Rondeux et al. (1986) in BIÉVELET et al. (2007)
- Wallonien	23.400	^b	2003	IPRFW (2003) in BIÉVELET et al. (2007)

Deutschland nimmt gegenwärtig hinter Frankreich im europaweiten Vergleich der absoluten Douglasien-Anbauflächen mit 217.000 ha den zweiten Platz ein (THÜNEN INSTITUT 2014). 2012 betrug der Anteil der Douglasie an der Waldfläche 2,0 % - was eine leichte Zunahme um 0,3 Prozentpunkte im Vergleich zu 2002 bedeutet (SCHMITZ et al. 2004). Nach der Bundeswaldinventur³ von 2012 (THÜNEN INSTITUT 2014) ist Rheinland-Pfalz das Bundesland mit den sowohl absolut (51.718 ha), als auch relativ (6,4 % der Waldfläche) größten Vorkommen, gefolgt von Baden-Württemberg (43.928 ha/3,3 %), Hessen (30.335 ha/3,6 %), Niedersachsen (27.464 ha/2,4 %) und dem Saarland (3.759 ha/3,7 %). Die anderen Bundesländer weisen Flächen < 20.000 ha und Anteile an der Waldfläche < 2,0 % auf, ein Schwerpunkt des Douglasienanbaus liegt somit im südwestdeutschen Raum (Abbildung 4). Zudem ergab die Bundeswaldinventur, dass die Douglasie zu circa je einem Drittel im Staatswald der Länder (35 %), im Körperschaftswald (33 %) und im Privatwald (32 %) stockt. Die hierzulande ersten Anbauten lagen 1868 im Forstamt Bad Herrenalb (WEIDENBACH 1980) und 1883 im Sachsenwald – Fürst Bismarck förderte den Exotenanbau damals aus modischen Gründen (DANCKELMANN 1884). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann die Forstwirtschaft verschiedene Provenienzversuche anzulegen, um geeignete Saatgüter zu identifizieren. Die anschließende Analyse dieser – und nachfolgender Standortversuche mit bereits optimalem Saatgut

– fokussierte auf waldbauliche Aspekte (KLÄDTKE et al. 2012, KOHNLE & EHRING 2008, HEIN et al. 2008, EHRING 2005, WEISE et al. 2001, WOBST & BECKER 1997, BARONIUS & FIEDLER 1996, SPELLMANN & NAGEL 1989, KENK & THREN 1984, SCHOBER et al. 1983, KENK & WEISE 1983, ABETZ 1971, FLÖHR 1958, JAHN 1955, DANCKELMANN 1884). Auch aus Zeiten vor der allgemein dokumentierten Anfangszeit des Douglasienanbaus scheint es noch einige Bestände zu geben (Altersklasse > 160 Jahre), doch wie in Abbildung 1 dargestellt, entfielen 2012 mehr als 2/3 der Douglasien in Deutschland auf die Altersklassen 21 bis 40 und 41 bis 61 Jahre (THÜNEN INSTITUT 2014). Im Vergleich der Flächenanteile einzelner Altersklassen mit Fichte und Kiefer zeigt sich, dass die Douglasie mit kurzen Umtriebszeiten von etwa 100 bis 120 Jahren bewirtschaftet wird (WEIDENBACH 1980).

Abbildung 1 Flächenanteile [%] von Douglasie, Fichte und Kiefer in 20-Jahres-Altersklassen für Deutschland und Baden-Württemberg (BW) nach Zahlen der Bundeswaldinventur 3 (THÜNEN INSTITUT 2014)



Die Frage, wieviel Raum die Douglasie in Zukunft einnehmen wird bzw. wieviel Raum ihr zugestanden wird, knüpft sich an die Themen Klimaerwärmung und Invasivität. Vor dem Hintergrund der prognostizierten Klimaerwärmung schätzen sowohl Forst-, als auch Naturschutzexperten, dass die Douglasienfläche in Deutschland zunehmen wird (REIF et al. 2009). Insbesondere auf trockenen Standorten sieht die Forstwirtschaft in der Douglasie einen geeigneten und aufgrund der Wuchsleistung willkommenen Ersatz der Fichte (BÄR 2009a). Auf Seiten des Naturschutzes wird die klimatische Eignung gewürdigt, Skepsis herrscht jedoch hinsichtlich des Invasionspotentials. Zur Ausbreitungstendenz der Douglasie im Schwarzwald gilt, dass die Douglasie fertile Nachkommen in der dritten Generation hervorbringt und auf einigen Standorten nicht von der potentiellen natürlichen Vegetation zurückgedrängt werden kann – sie also dort ein Agriophyt ist (KNOERZER 1999). Zudem besteht ein Unterschied zwischen in Fichten- bzw. Douglasiennähe anzutreffender Flora und Fauna (MEYER 2011), was die geforderte Einrichtung von Douglasien-Pufferzonen um naturschutzrelevante Standorte rechtfertigt (NEHRING et al. 2013). Aus Einzelbeispielen eine generelle Invasivität abzuleiten erscheint jedoch fragwürdig – angesichts von Wissensdefiziten zu Ökologie und Folgen des Anbaus für Flora und Fauna einerseits und Argumentationen von gegensätzlich motivierten Akteuren

andererseits (HARTARD & SCHRAMM 2009). Die emotionale Dimension der Diskussion zeigt sich im Ausreißen von Jungpflanzen durch Greenpeace-Aktivisten (AGRAR HEUTE 2012) und der Kreation des Begriffes ‚Verdouglasierung‘ (GAEBELER 1981).

Niedersachsen dient als Beispiel der aktuellen politischen Dimension des Douglasienanbaus: Wurde 2004 von der konservativ-liberalen Landesregierung beschlossen, den Anteil der Douglasie bis 2040 von 3 % auf bis zu 6 % anwachsen zu lassen (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2004), so erwog das von einem Grünen-Minister geleitete Ministerium für ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, die Douglasie im Jahr 2014 zwischenzeitlich von finanzieller Förderung auszuschließen (RdErl. d. ML v. 16. 10. 2007 - 406-64030/1-2.2 - (Nds. MBl. S. 1379), zuletzt geändert durch RdErl. vom 03.01.2011 - 406-64030/1-2.2 - (Nds. MBl. S. 155), Entwurf). Dies könnte die Forstwirtschaft nicht übermäßig beeindrucken: Mit der Förderung verbundene Richtlinien zum Anbau und zur Beimischung anderer Baumarten bräuchten nicht umgesetzt werden und die Wertschöpfung ließe einen Verzicht auf Förderung zu (persönliche Mitteilung HEWICKER, J. A. (23.01.2014): Ausschluss der finanziellen Förderung von Douglasienbeständen in Niedersachsen, mündlich). Kleine Anfragen sowie ein Antrag der konservativen Opposition (NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG 2014a, NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG 2014b, NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG 2014c) und ein Zeitungsartikel Ende 2014 (EXNER 2014) führten dazu, dass der im Richtlinienentwurf formulierte Satz ‚die Douglasie wird nicht gefördert‘ gestrichen wurde.

Anders ist die Situation in Baden-Württemberg: Auf eine Anfrage der Grünen im Landtag hinsichtlich der Bedeutung von Douglasien(rein)beständen für den Erhalt der biologischen Vielfalt erwiderte das damals noch konservativ geführte Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum, die Douglasie werde seit 100 Jahren angebaut und ihre Ausbreitung sei waldbaulich steuerbar (Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum 14. 01. 2009). Auch nach der 2011 erfolgten Ablösung der bisher konservativ-liberalen Landesregierung und der Übernahme des Ministeriums für ländlichen Raum und Verbraucherschutz durch einen Grünen-Minister trägt die Douglasie zum Umbau bisheriger Fichten-Monokulturen bei – mit dem Ziel, wertvolles Stammholz zu erziehen und unter Würdigung ihrer Eignung im Klimawandel (WICHT-LÜCKGE 2014). Die Zielsetzung aus dem Jahr 1980 lautete, Douglasie zu Lasten von Kiefer zu pflanzen und um die Jahrtausendwende einen Douglasienanteil von 8 % der Waldfläche etabliert zu haben (MOOSMAYER 1977). Zwar änderte sich die zu substituierende Baumart, doch die kontinuierliche Integration der Douglasie in den öffentlichen Wald von 1 % der Waldfläche im Jahr 1977 (MOOSMAYER 1977), über 2,8 % in 2002 (SCHMITZ et al. 2004) bis zu 3,3 % in 2012 (THÜNEN INSTITUT 2014) schreitet voran.

2.2 Das Holz der Douglasie

Die Douglasie bildet weißlich bis blassgelbes bzw. -rotes Splintholz und gelblich bis dunkelrotes Kernholz (PANSHIN & DE ZEEUW 1980), das anhand von spiraligen Verdickungen in den Zellwänden

von sowohl Früh-, als auch Spätholztracheiden bei gleichzeitigem Vorhandensein von Harzkanälen mikroskopisch eindeutig identifizierbar ist (WAGENFÜHR & SCHEIBER 1985). Analog zum ausgedehnten Verbreitungsgebiet variieren wesentliche Eigenschaften des Holzes (PANSHIN & DE ZEEUW 1980, BENDTSEN 1978, FOREST PRODUCTS LABORATORY 1999), so dass Herkunft und Wuchsbedingungen einzelne Sortimente definieren: nordamerikanisches Holz wird unterschieden nach *old-growth* und *second-growth* sowie Küsten- bzw. Inlandsherkunft, während aus Europa lediglich eine mittlerweile als ‚Europäische Douglasie‘ gehandelte *second-growth* Küstenherkunft kommt. Das Holz aus *old-growth* Beständen ist geschätzt wegen seiner guten Qualität, insbesondere der Feinringigkeit und Astreinheit bzw. Feinastigkeit im Alter (NEWTON et al. 2012, GROSSER & TEETZ 1998). Zudem ist derart altes Holz dichter und fester als *second-growth* Sortimente (LANGUM et al. 2009, BORMANN 1984, PANSHIN & DE ZEEUW 1980). Die Holzeigenschaften leiten sich ab aus dem langsamen Wuchs, der durch waldbauliche Maßnahmen allerdings auch bei *second-growth* Beständen erreicht werden kann. Langsam gewachsenes Douglasienholz zeigt enge Jahrringe, einen abrupten Übergang von Früh- zu Spätholz, geringe Spätholzanteile und eine eher gelbliche Farbe (*yellow fir*) im Vergleich zu schnell gewachsenem rötlichen (*red fir*) Holz (PANSHIN & DE ZEEUW 1980). Durch den Rückgang der Verfügbarkeit von *old-growth* Holz vollzog sich ein Wandel hin zur Nutzung und Erforschung von *second-growth* Holz, dessen Marktanteil deutlich zunahm (NEWTON et al. 2012, LANGUM et al. 2009, SPICER et al. 2000, DI LUCCA 1987). Unterschiede zwischen dem Holz aus dem Küsten- und Inlandsgebiet bestehen in den verwendbaren Dimensionen, der Rohdichte, dem Spätholzanteil und der Festigkeit, wobei die Küstendouglasie höhere Werte aufweist (PANSHIN & DE ZEEUW 1980, PAUL 1963). Die Variation der Holzeigenschaften hat dazu geführt, dass Konstruktionsrichtlinien in den Vereinigten Staaten einzig für die Douglasie nach Wuchsgebieten unterschiedene Holzeigenschaften ausweisen (BENDTSEN 1978). Basierend auf der Dimension und Qualität des Holzes reicht seine Verwendung von Furnieren über Bauholz, Verkleidungen, Verpackungen, Möbel und Industrieholz bis zu Brennholz und Weihnachtsbäumen (KRAMER & SMITH 1985, BORMANN 1984, PECHMANN 1963, GÖHRE 1958). Anknüpfend an intensive Untersuchungen durch Forschungseinrichtungen der nordamerikanischen Westküste ist das Holz europäischer Douglasien seit der grundlegenden Arbeit von GÖHRE (1958) untersucht worden. Der Forschungsschwerpunkt liegt auf den technischen Eigenschaften des Holzes (POLLET et al. 2013, HAPLA 1996, FISCHER 1994, SAUTER 1992, MÖHLER & BEYERSDORFER 1987, HAPLA 1986, HAPLA 1985, HAPLA 1981, SCHULTZE-DEWITZ & GÖTZE 1973, PECHMANN & COURTOIS 1970, RACZKOWSKI 1963, KNIGGE 1958). Außerdem wurde die natürliche Dauerhaftigkeit europäischer Douglasie bestimmt (BLOHM et al. 2014b, POLLET et al. 2012, RAPP et al. 2010, AUGUSTA 2007, AKHTER & HALE 2002a, AKHTER & HALE 2002b, POLMAN & MILITZ 1996). Weniger untersucht sind hingegen diejenigen strukturellen Eigenschaften des Douglasienholzes, die mechanische und physikalische Eigenschaften bestimmen (BAWCOMBE 2012, RATHGEBER et al. 2006, DE KORT 1990). Nach diesen Untersuchungen sind die

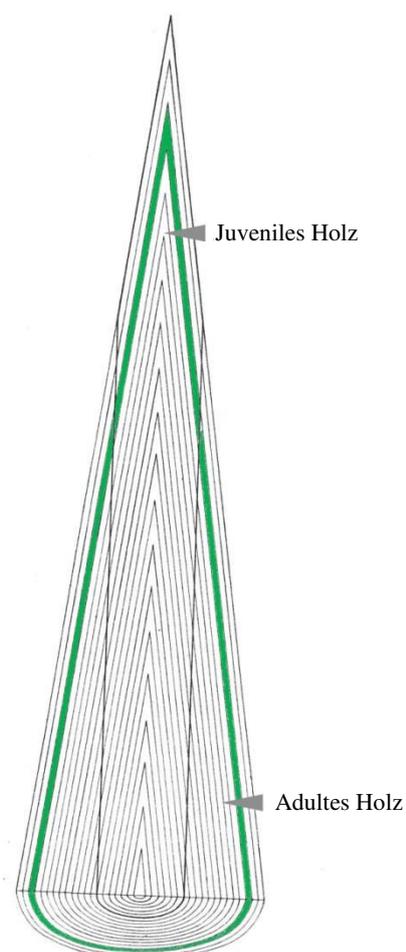
mechanischen und biochemischen Eigenschaften europäischer Douglasie der Fichte ebenbürtig und teilweise sogar besser. Praxisrelevant für die Bearbeitbarkeit ist die Variabilität der Jahrringstruktur: mit zunehmender Grobringigkeit nimmt die Sprödigkeit des Holzes zu. Die Rohdichte des Holzes ist mit anderen Nadelhölzern verglichen eher hoch und das Holz relativ hart. Desweiteren ist die Tränkbarkeit gering, die Dauerhaftigkeit mittel bis gering, die Verklebbarkeit gut bis mittel und bei niedrigen Temperaturen ist das Holz ohne störenden Harzaustritt zu trocknen (OELKER & RICHTER 2006, DIN 350-2 (1994), GROSSER & TEETZ 1998).

2.3 Definition des juvenilen und adulten Holzes

Bisher existiert keine allgemeingültige Definition für juveniles bzw. adultes Holz (ILIC et al. 2003). Gemäß der Wortherkunft *iuvenis* (lat. jugendlich) wird als juveniles Holz Gewebe bezeichnet, das gebildet wird, wenn das Holz jung ist. Als Maßstab angelegt wird der Begriff des kambialen Alters, das definiert ist als die Zeit, die seit Keimung des Baumes verstrichen ist. Das kambiale Alter wird in der Einheit Lebensjahre gemessen. Beschrieben wird juveniles Holz als ein um die Markröhre gelegener Zylinder, der von der Stammbasis bis zum Apikalmeristem reicht (NAWROT et al. 2012), mehrere Jahrringe zählt und sich durch relativ stark schwankende Eigenschaften vom markfernen, adulten Holz mit eher konstanten Eigenschaften unterscheidet (WALKER, J. C. F. & NAKADA 1999). Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, sind die Eigenschaften eines an der Stammbasis dem adulten Holz zugeordneten Jahrringes einem sukzessiven Wandel unterworfen, so dass derselbe Jahrring nahe dem Apikalmeristem als juvenil gilt (RENDELE 1959). Daher bestimmt die Nennung eines kambialen Alters in Lebensjahren nicht allein das Ausmaß juvenilen Holzes, sondern zusätzlich ist die Nennung der Stammhöhe erforderlich. Andere Bezeichnungen juvenilen Holzes sind ‚core wood‘ oder ‚kronengebildetes Holz‘. Damit wird der Theorie Rechnung getragen, die Bildung juvenilen Holzes werde durch die vom Apikalmeristem emittierten Phytohormone reguliert (NAWROT et al. 2012). Die Theorie lautet weiter, die Bildung adulten Holzes begönne zum Zeitpunkt der Kulmination des jährlichen Höhenzuwachses vom Stammfuß aus (KUČERA 1994) und reiche in höhere Bereiche bis unterhalb der lebenden Krone (DI LUCCA 1987, PANSHIN & DE ZEEUW 1980).

Abbildung 2

Schematische Darstellung des juvenilen Zylinders, bearbeitet nach RENDELE (1959)



Nach jüngeren Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass der an der Stammbasis beginnende adulte Holzring auch das untere Drittel der lebenden Krone ummantelt (GARTNER et al. 2002). Die Abgrenzung von juvenilem und adultem Holz basiert immer auf einem von der Wachstumsgeschwindigkeit unabhängigen kambialen Alter (BENDTSEN 1978), das individuell für jeden Baum zu ermitteln ist und eine Anzahl von juvenilen Jahrringen zum Ergebnis hat (ILIC et al. 2003). In früheren Untersuchungen an amerikanischen Douglasien lag der Übergang von juvenilem zu adultem Holz im Bereich eines kambialen Alters von 12 (WINANDY & MORRELL 1993, ERICKSON & HARRISON 1974), 15 (DE KORT 1990, COWN 1976), 5 bis 20 (SENFTE et al. 1985), 22 (DI LUCCA 1987) bzw. 26 (ABDEL-GADIR & KRAHMER 1993a) Jahren. Diese Altersangaben variieren einerseits mit dem untersuchten Material, andererseits mit dem für die Abgrenzung der juvenilen Phase zugrunde gelegten Merkmal. Auf Provenienz- oder Familienebene werden kambiale Alter von 22 bis 29 bzw. 17 bis 30 Jahren für den Übergang von juvenilem zu adultem Holz angegeben (ABDEL-GADIR & KRAHMER 1993b). Die Eigenschaften juvenilen Holzes unterscheiden sich von adultem Holz, so dass der Übergang vom juvenilen zum adulten Holz anhand verschiedener Merkmale zu identifizieren ist. Hierzu dienen einige der von BENDTSEN (1978) genannten anatomischen Merkmale und der daraus abgeleiteten mechanischen Eigenschaften juvenilen Holzes:

- **Niedrigere Spätholzanteile**
Der Spätholzanteil nimmt vom Mark zum Kambium zu (RENDELE 1959), bis ein relativ konstanter Wert erreicht ist. Für Douglasie gilt circa 42 % Spätholzanteil als Anzeichen des Beginnes der Bildung adulten Holzes (KNIGGE 1958). Vornehmlich in schnell gewachsenem Holz ist der Übergang vom Früh- zum Spätholz in der juvenilen Phase eher gleitend (LARSON et al. 2001, RENDELE 1960, MCKIMMY 1959) – allerdings zeigt auch adultes Holz, das schnell gewachsen ist, gleitende Früh-Spätholzübergänge (SCHWEINGRUBER & BAAS 2011).
- **Dünnere Zellwände**
Die Zellwanddicke nimmt vom Mark zum Kambium zu, insbesondere die Dicke der Spätholztracheiden (GÖHRE 1958). Da die Zellwanddicke über einen langen Zeitraum sukzessiv zunimmt, erscheint dieses Merkmal weniger gut geeignet, um den Übergang vom juvenilen zum adulten Holz zu bestimmen (GATTO et al. 2010).
- **Kürzere Tracheiden**
Adulte Tracheiden sind länger als juvenile Tracheiden (PHILIPSON & BUTTERFIELD 1968, RENDELE 1959) – die Länge der Tracheiden des adulten Holzes kann bei Koniferen das drei- bis vierfache der Länge juveniler Tracheiden betragen (ANDERSON 1951). Nach Untersuchungen an nordamerikanischer Douglasie steigt die Tracheidenlänge etwa bis zu einem kambialen Alter von 15 Jahren relativ stark an (FABRIS 2000, JOZSA & MIDDLETON 1994, ERICKSON & HARRISON 1974). Übereinstimmend ist für niederländische Douglasie ein starker Anstieg der Tracheidenlänge im kambialen Alter von 15 bis 20 Jahren dokumentiert (DE KORT 1990). Eine

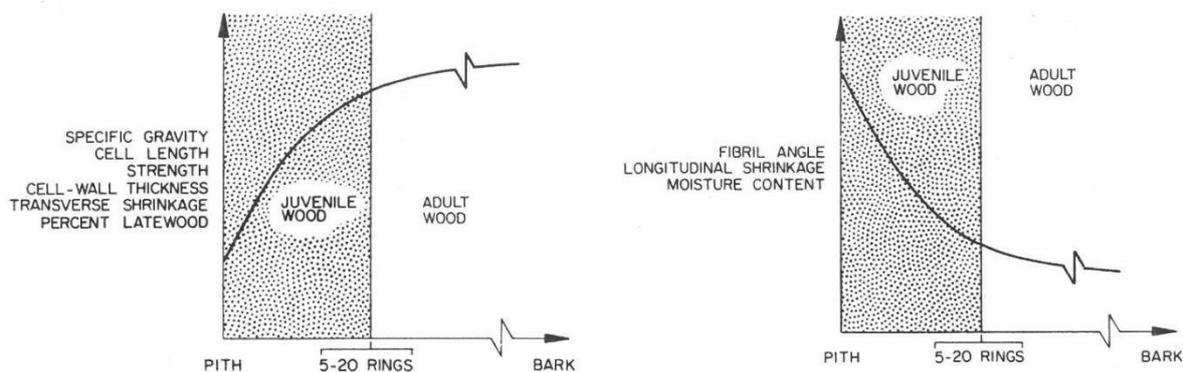
schwache Zunahme der Tracheidenlänge kann bis in kambiale Alter von 450 Jahren beobachtet werden (GERRY 1916).

- **Größere Mikrofibrillenwinkel**
Der Mikrofibrillenwinkel nimmt vom juvenilen zu adulten Holz ab (LICHTENEGGER et al. 1999). Nach Untersuchungen von ERICKSON & ARIMA (1974) ändert sich der Mikrofibrillenwinkel bei amerikanischen Douglasien von 32 ° im ersten Jahrring zu 7 ° im 30. Jahrring.
- **Niedrigere Gehalte von (kristalliner) Cellulose**
Bei Untersuchungen zur Abgrenzung von juvenilem und adultem Holz europäischer Lärchen fanden NAWROT et al. (2012) einen erst im adulten Holz konstanten, höheren Anteil kristalliner Cellulose. Ob diese Beobachtung auch auf andere Koniferen übertragbar ist, muss noch geklärt werden.
- **Höhere Ligningehalte**
Durch relativ dünne Sekundärwände der Tracheiden im Verhältnis zur Mittellamelle ist der Ligningehalt juvenilen Holzes höher als im adulten Holz (MEGRAW 1986).
- **Geringere Rohdichten**
Abgeleitet aus der Zunahme der Zellwanddicke und des Spätholzanteils nimmt mit dem kambialen Alter auch die Rohdichte zu (WOBST & BECKER 1997). Die Rohdichte juvenilen Douglasienholzes beträgt etwa 87 % der Rohdichte des adulten Holzes (GERHARDS 1979). Außerdem ist der Rohdichteunterschied zwischen Früh- und Spätholz im juvenilen Holz geringer als im adulten Holz (HAPLA 1981).
- **Geringere Querschwindung, höhere Längsschwindung**
Die Schwindungseigenschaften juvenilen Holzes leiten sich aus im Vergleich zum adulten Holz größeren Mikrofibrillenwinkeln ab (BARBER & MEYLAN 1964).
- **Geringere Festigkeiten**
Die geringere Festigkeit ist bedingt durch die kürzeren und dünnwandigeren Tracheiden, die größeren Mikrofibrillenwinkel, den niedrigeren Spätholzanteil, sowie die daraus resultierende geringere Rohdichte.
- **Mehr Druckholz**
Auf laterale Krafteinwirkung wie z.B. Wind reagieren junge Sprossachsen mit der Bildung von Reaktionsholz, im Falle der Douglasie mit Druckholz (LICHTENEGGER et al. 1999)
- **Höhere Feuchtegehalte**

Weitere, von BENDTSEN (1978) nicht genannte Eigenschaften (Abbildung 3) unterscheiden sich im juvenilen und adulten Holz. Gesondert zu betrachten sind Eigenschaften, die sich aus der regulären Verkernung des Holzes ableiten, da diese mehrere Jahre nach dem Ausdifferenzieren der Zellen beginnt. Zwar wird der Extraktstoffgehalt vor allem durch das Alter der Bäume beeinflusst

(HILLIS 1987), doch erfolgt die Einlagerung dieser Stoffe nicht zu dem Zeitpunkt, zu dem das Holz jung ist. Demnach kann die vom Mark zum Kambium steigende Konzentration des im Douglasienholz wesentlichen Flavanonols Taxifolin (Dihydroquercitin) als sekundär juvenile bzw. adulte Eigenschaft gelten (GARDNER & BARTON 1960, HANCOCK 1957). Analog zur Zunahme der Extraktstoffe nimmt generell auch die natürliche Dauerhaftigkeit vom Mark nach außen zu (DÜNISCH et al. 2009, RENDELE 1960).

Abbildung 3 Schematische Radialprofile der Charakteristika juvenilen und adulten Holzes mit zunehmendem Abstand vom Mark, nach BENDTSEN (1978), angepasst.



Anhand der beschriebenen Unterschiede der Eigenschaften wird der Übergang vom juvenilen zum adulten Holz identifiziert, wobei die gefundenen Zeitpunkte je nach zugrunde gelegtem Merkmal variieren (BAWCOMBE 2012, MANSFIELD et al. 2009, BENDTSEN 1978). Da die primären Merkmale Spätholzanteil, Tracheidenlänge und Mikrofibrillenwinkel eher plötzlich adulte Werte annehmen, erscheinen sie zur punktuellen Abgrenzung besonders geeignet, während anhand der sich langfristig sukzessiv verändernden Merkmale kaum ein Zeitpunkt des Überganges von juvenilem zu adultem Holz bestimmen lässt (RAHAYU et al. 2014, GATTO et al. 2010, BENDTSEN 1978) und daher auch die Definition einer Übergangszone diskutiert wird (WALKER, J. C. F. & NAKADA 1999). Das Merkmal Jahrringbreite kann aufgrund von biotischen (und teilweise waldbaulichen) Einflüssen nicht alleinig zur Abgrenzung von juvenilem und adultem Holz herangezogen werden (LARSON et al. 2001, PANSHIN & DE ZEEUW 1980, RENDELE 1960). Im Umkehrschluss maskiert eine waldbaulich induzierte, feinringige Jahrringstruktur (PAUL 1960) das juvenile Holz lediglich (LARSON et al. 2001) – eher adulte Eigenschaften relevanter Merkmale sind nicht unbedingt garantiert. Eine mögliche Einflussnahme zur Erhöhung des Anteiles adulten Holzes bestünde nach der ‚kronengebildetes Holz‘-Theorie in der Grünastung, die zur Wertholzerzeugung bei Douglasie ohnehin unabdinglich ist (SACHSSE & ROFFAEL 1993). Dahingehende Untersuchungen von GARTNER et al. (2002) zeigten allerdings, dass Astung keinen Einfluss auf den Zeitpunkt des Überganges von der Bildung juvenilen bzw. adulten Holzes hat, vermutlich aufgrund des unveränderten Einflusses des Apikalmeristems. Der einzig zielführende Ansatz zur Reduzierung des juvenilen Holzes ist genetische Manipulation, da ein

Teil der von ABDEL-GADIR & KRAHMER (1993b) gefundenen Unterschiede in der Dauer juveniler Phasen auf Familien innerhalb von Provenienzen zurückzuführen war. Die stark variierenden und sich vom adulten Holz unterscheidenden Eigenschaften haben zu Folge, dass bei vielen Verwendungen der Einsatz juvenilen Holzes minimiert oder ausgeschlossen wird (WALKER, J. C. F. & NAKADA 1999, GARDNER & BARTON 1960). Dennoch gibt es Nutzungen, in denen juvenile Holzeigenschaften erwünscht sind: so ist juveniles Holz mit gleitenden Früh-Spätholzübergängen kontrastärmer, die geringere Querschwindung kann für spezielle Anwendungen förderlich sein, dünnwandige Fasern lassen sich in der Papierherstellung besser aufschließen (ILIC et al. 2003) und geringere Rohdichten sind geeignet zur Verwendung im Leichtbau (BENDTSEN 1978). Die Eigenschaften juvenilen Holzes können interpretiert werden als eine mechanische Optimierung junger Bäume zur elastischen Kompensation der Beanspruchung durch streifend-passierende Tiere oder auftreffende Winde. Mit zunehmendem Gewicht der Biomasse garantieren Eigenschaften adulten Holzes eine steigende Widerstandskraft gegen die Gravitation (BARNETT & BONHAM 2004, LICHTENEGGER et al. 1999).

3 Material und Methoden

Im Folgenden werden das untersuchte Material und die Untersuchungsmethoden beschrieben.

3.1 Material

Die nächsten drei Abschnitte nennen Hintergrundinformation zur Herkunft und allgemeine Charakteristika der Stammabschnitte der Bäume aus dem Standraumversuch in Baden-Württemberg. Außerdem wird das Vorgehen zur Auswahl des Untersuchungsmaterials beschrieben.

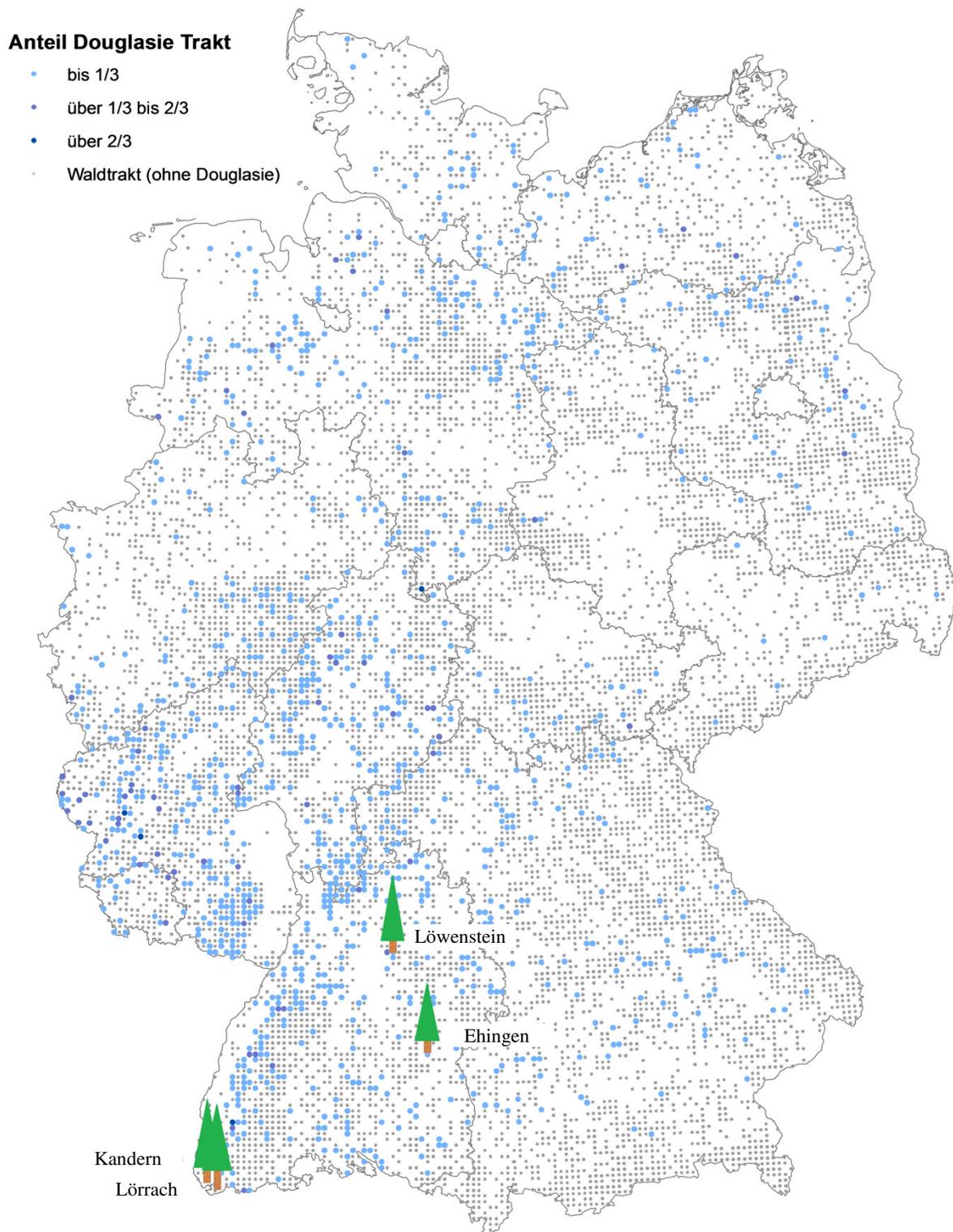
3.1.1 Douglasienholz aus dem Standraumversuch in Baden-Württemberg

Zur Untersuchung der Eigenschaften juvenilen und adulten Holzes der Douglasie wurden 20 Bäume von den vier in Abbildung 4 gezeigten Standorten des Standraumversuches in Baden-Württemberg ausgewählt (ABETZ 1971, KENK & WEISE 1983, WEISE et al. 2001, EHRING 2005, KOHNLE & EHRING 2008). Der Standort Kandern wurde bereits 1971 gepflanzt, es folgten 1973 die Standorte Lörrach und Löwenstein und zuletzt 1974 der Standort Ehingen (KENK & WEISE 1983). Während der Standort Ehingen mit im Handel erworbenen Pflanzen aus Verschulungsbeeten des Rasters 17,5 x 7 cm² begründet wurde, stammen die für die anderen drei Standorte ausgesuchten Pflanzen aus nahe gelegenen Pflanzgärten mit 20 x 20 cm² Verschulrastern. Auf allen Standorten wurde die Provenienz „Sonderherkunft Südbaden“ verwendet; die Versuchsflächen wurden in einheitlicher Weise angelegt. Es wurden die 35 % kleinsten und die 15 % größten Douglasien aussortiert, um zumindest zum Zeitpunkt der Pflanzung eine weitgehend homogene Höhenverteilung zu erhalten (ABETZ 1971). Die kleineren Bäume wurden als Umfassung verwendet, größere Bäume wurden als Reserve für ausfallende Individuen abseits verpflanzt. Ein Jahr nach Anlage der Standorte wurden – im Rückgriff auf die 15 % der als zu groß aussortierten Pflanzen – Nachbesserungen vorgenommen. Auf den einzelnen Feldern der Standorte sollten die in Tabelle 2 genannten verschiedenen Reihenabstände und Pflanzzahlen pro Hektar realisiert werden, wobei zwischen favorisiert anzulegenden Feldern und potentiellen Laubmischwald-Feldern unterschieden wurde.

Tabelle 2 Varianten des Douglasien-Standraumversuches, Pflanzzahlen pro Hektar [n/ha] und Wuchsraum je Pflanze [m²]. Durchgezogene Umrandung: favorisiert anzulegende Felder, gestrichelte Umrandung: Mischwald-Felder.

Pflanzzahlen pro Hektar [n/ha]		500	1000	2000	4000	
Wuchsraum je Pflanze [m ²]		20	10	5	2,5	
Reihenabstand [m]	2		Favorisierte Varianten		2 x 2,50	2 x 1,25
	3		3 x 3,33	3 x 1,67	3 x 0,83	
	4	Mischwaldbestände	4 x 2,50	4 x 1,25		
	5	5 x 4,00	5 x 2,00	5 x 1,00		
	6	6 x 3,33	6 x 1,67			
	7	7 x 2,85	7 x 1,43			

Abbildung 4 Vorkommen von Douglasien in Trakten (4 km x 4 km) der Bundeswaldinventur 3 (THÜNINGEN INSTITUT 2014, Karte KROIHER) mit Standorten des untersuchten Holzes.



Auf Initiative der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten wurden Anfang der siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts im ganzen Bundesgebiet Douglasien-Standraumversuche angelegt, um grundlegend neue Erkenntnisse zur bestmöglichen Bewirtschaftung von Douglasienstandorten zu gewinnen – nach damaligem Stand wurde noch kein von der Pflanzung bis zur Erntereife betreuter Versuch durchgeführt (ABETZ 1971). KENK & WEISE (1983) widmeten sich einer intensiven wissenschaftlichen Betreuung und Beschreibung der Versuchsflächen. Hierzu gehörte zunächst die in Tabelle 3 dargestellte Charakterisierung der Standorte nach Relief und Klima.

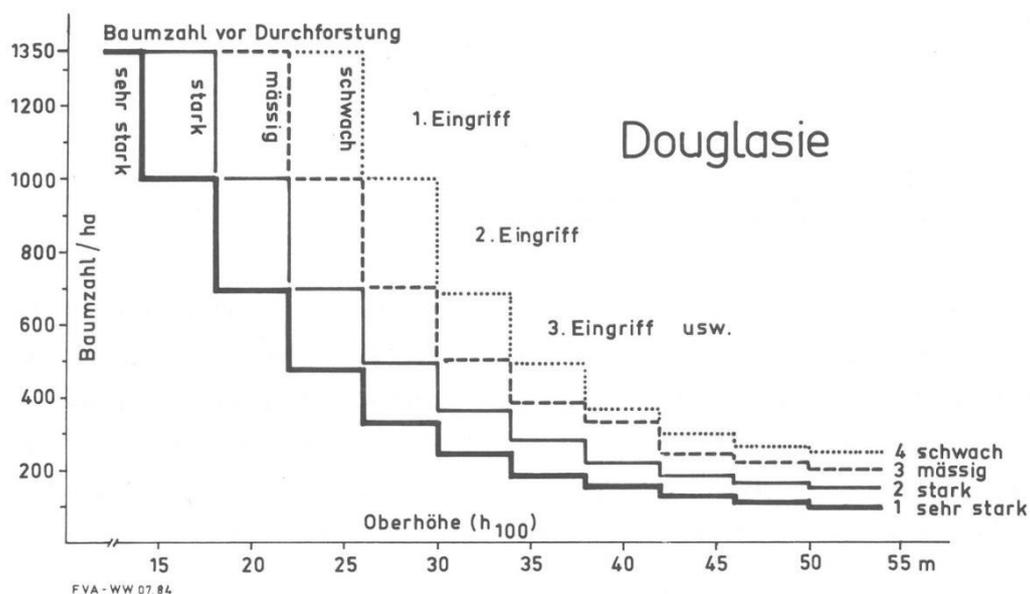
Tabelle 3 Standorte des untersuchten Materials, nach KENK & WEISE (1983), ergänzt um den Standort Kandern (persönliche Mitteilung ŠEHO, M. (10.12.2012): Information zur Versuchsfläche Dgl 96 (Fbz. Kandern, Staatswald 5/24), Kopie).

	Lörrach	Kandern	Ehingen	Löwenstein
Fläche: Dgl_	_81	_96	_87	_86
Saatgut	Sonderherkunft "Südbaden"	Sonderherkunft "Südbaden"	Sonderherkunft "Südbaden", aber Handelspflanzen	Sonderherkunft "Südbaden"
Keimungsjahr	1970	1968	1971	1970
Pflanzjahr (3-jährig)	1973	1971	1974	1973
Kambiales Alter (2011)	42	44	41	42
Gebiet	Schwarzwald	Schwarzwald	Alb-Donau / Ulm	Neckarland / Heilbronn
Höhe [m über N.N.]	580 - 605	780	700 - 720	410 - 440
Gebirgsstufe	(tief)montan / Gebirgsstufe	mittel-/obermontan / Gebirgsstufe	mittel-/obermontan / Gebirgsstufe	submontan / Mittelgebirgsstufe
Boden	mäßig frischer, teilweise flachgründiger Feinlehm	mäßig trockener & lehmig grusiger (Steinschutt)-Sommerhang	mäßig frischer Mergelton - steiniger Lehm mit teilweise freiem Kalk im Oberboden	mäßig trockener anlehmiger Sand
Exposition / Hangneigung	flacher bis leicht geneigter S-Hang	schwach geneigter SW-Hang	schwach geneigter S-Hang	stark geneigter SW-Hang
Mittlerer Jahresniederschlag [mm]	960	1100	740	740
Mittlere Jahrestemperatur [°C]	9,8	7,5	6,4	9,5

Beurteilt nach den durchschnittlichen Höhenzuwächsen der Jahre 1980 bis 1983 folgte eine Bonitierung der Standorte; die höchste Güte hat der Standort Lörrach, gefolgt von Ehingen und Löwenstein (KENK & WEISE 1983). Der Standort Kandern ist aufgrund seines Bodens und seiner Ausrichtung mit Ehingen vergleichbar, wobei höhere mittlere Jahresniederschläge begünstigend wirken, während allerdings wachstumsfördernder freier Kalk fehlt. Um die hinsichtlich ihrer Güte verschiedenen Standorte im weiteren Verlauf desandraumversuches miteinander vergleichen zu können, aber gleichzeitig einen individuellen Durchforstungssturnus zuzulassen, schlug ABETZ (1971) vor, die Felder nach ihrer Höhenentwicklung zu durchforsten, so dass jedes Feld irgendwann auf die gleiche Stammzahlhaltungskurve stößt. Den in Abbildung 5 dargestellten Behandlungsablauf für starke Durchforstung nach KENK & HRADETZKY (1984) zugrunde legend, wurde nach der Oberhöhe

der 100 höchsten Bäume (h_{100}) jeweils nach drei Metern Höhenzuwachs zukunftsbaumorientiert durchforstet.

Abbildung 5 Behandlungsabläufe nach KENK & HRADETZKY (1984) mit verschiedenen Eingriffsstärken



Die für die Untersuchungen ausgewählten Bäume decken in ihrer Kombination die größtmögliche Spanne forstlich zu rechtfertigenden Waldbaus ab, weshalb das Sortiment, da es weder als Qualitätsholz, noch als industrieübliches Material gelten kann, nicht markttypisch ist. Vielmehr bildet die Auswahl der Bäume verschiedene Wachstumsmodelle ab, wobei die Brusthöhendurchmesser der Bäume alle fünf Jahre aufgenommen wurden, um die Bäume den Wachstumsmodellen zuzuordnen. Zusätzlich zu den Wachstumsmodellen unterscheiden sich die Bestände hinsichtlich ihrer Ausgangspflanzzahlen und Pflanzabstände. Wie in Tabelle 4 dargestellt, wurde auf allen vier Standorten jeweils ein den folgenden Wachstumsmodellen entsprechender Baum ausgewählt:

- ‚langsam‘ (L): minimaler Durchmesser, durchgängig langsam gewachsen.
- ‚schnell‘ (S): maximaler Durchmesser, durchgängig schnell gewachsen.
- ‚schnell-langsam‘ (SL): erst schnell, dann langsam gewachsen. Die Bäume wuchsen zuerst weitständig und mit geringem Konkurrenzdruck. Mit zunehmendem Alter erhöhte sich die Konkurrenz deutlich, da die Bestände erst spät und nur einmal durchforstet wurden.
- ‚langsam-schnell‘ (LS): erst langsam, dann schnell gewachsenen. Diese Bäume wurden eng gepflanzt, weshalb der Konkurrenzdruck hoch war. Mit fortschreitendem Alter wurden die Bäume mehrfach freigestellt, was die Konkurrenz verringerte und den Wuchs beschleunigte.

- Brusthöhendurchmesser ~ 40 cm (BHD 40): der Baum eines Versuchsfeldes, dessen Brusthöhendurchmesser 40 cm am nächsten kommt. Diese Bäume zeigten die zweitkleinsten Durchmesser und dienen zur Abdeckung des gesamten Durchmesserspektrums.

Der Einschlagtermin für die Standorte Lörrach und Kandern war der 11. Juni 2012, auf den Standorten Ehingen und Löwenstein wurden die ausgewählten Bäume am 13./14. Juli 2012 gefällt. Nach dem Einschlag wurden die Stammabschnitte am 4. Juli und 6. August 2012 im Sägewerk Michelsen, Mölln, mithilfe eines Vollgatters in 6,5 cm dicke Bohlen aufgetrennt und in einer Trockenkammer (Labortrockner, 1 x 1 x 2 m² Nutzraum, individuell programmierbarer Computersteuerung) bei maximal 58 ± 3 °C auf eine elektronisch gemessene Zielfeuchte von 12 % Holzfeuchte getrocknet.

Tabelle 4 Pflanzverband [m²], Standraum [m²], Wachstumsmodell, Brusthöhendurchmesser ohne Rinde (BHD o. R.) [cm], Abholzigkeit [cm/m] und Durchforstungsjahre der Bäume aus dem Standraumversuch. Wachstumsmodelle: BHD 40 – Brusthöhendurchmesser 40 cm, LS – langsam-schnell, S – schnell, SL – schnell-langsam, L – langsam.

Standort	Baum	Pflanz- ver- band [m ²]	Stand- -raum [m ²]	Wuchs- modell	BHD o. R. [cm]	Abhol- zigkeit [cm/m]	Durchforstungen					
Lörrach	61	5x2,00	10	BHD 40	26,7	0,6						
	454	5x1,00	5	LS	46,5	0,9	1989	1991	1994	2000	2003	2008
	576	2x1,25	2,5	S	51,2	0,8						
	103	5x1,00	5	SL	42,7	0,7	1989	1991	1994	2000	2003	2008
	78	3x1,67	5	L	34,6	0,6						
Kandern	19	3x3,33	10	L	28,2	0,8			1994			
	122	5x2,00	10	BHD 40	34,9	0,6			1994			
	22	5x4,00	20	SL	42,1	0,5					2000	
	162	3x1,67	5	S	52,9	1,6		1990	1994	2000	2004	2009
	222	5x1,00	5	LS	44,4	0,6		1990	1994	2000	2004	2009
Ehingen	121	6x3,34	20	SL	45,2	1,2						2010
	221	3x3,33	10	BHD 40	36,3	0,7						
	94	5x4,00	20	S	48,1	1,4						
	203	5x2,00	10	LS	43,7	0,9				2000	2005	2010
	120	3x1,67	5	L	22,1	0,5						
Löwen- stein	184	4x2,50	10	BHD 40	37,5	0,6						
	66	5x4,00	20	SL	45,3	1,7						2007
	366	2x1,25	2,5	LS	41,1	1,0	1988	1990	1993	1997	2002	2007
	400	3x1,67	5	S	51,0	1,3						
	41	2x1,25	2,5	L	26,0	0,7						

3.1.2 Älteres Douglasienholz

Aus einem Praxiseinschlag in Kandern wurden Mitte Juli 2014 von gepoltertem Material zusätzlich vier Stammscheiben abgetrennt, die im Mittel 85 Jahrringe, 61 Kern- und 24 Splintjahrringe und 73 cm Durchmesser zeigen. Da das Keimungsjahr der Bäume nicht bekannt ist, kann das kambiale

Alter der Bäume nicht bestimmt werden. Gesichert kann die Anzahl der Jahrringe als minimales kambiales Alter angesetzt werden. Unter Annahme einer angestrebten maximierten Ausbeute ist davon auszugehen, dass die Scheiben aus geringer Höhe über dem Erdboden stammen. Die Stammscheiben der Bäume aus dem Standraumversuch weisen in Brusthöhe 4 bis 7 Jahrringe Differenz zum kambialen Alter des Baumes auf – geringer dürfte die Differenz am Erdboden sein.

3.1.3 Untersuchte Bereiche

Aus dem Standraumversuch stehen von allen 20 Bäumen eine Stammscheibe aus Brusthöhe und der stammaufwärts angrenzende Abschnitt aus 1,40 bis 3,40 m Höhe zur Verfügung. Das Holz älterer Bäume beschränkt sich auf vier Stammscheiben, die nur teilweise orientierend untersucht wurden. Alle Untersuchungen wurden am Holz aus dem Standraumversuch durchgeführt. Es wurden verschiedene radiale Bereiche geprüft:

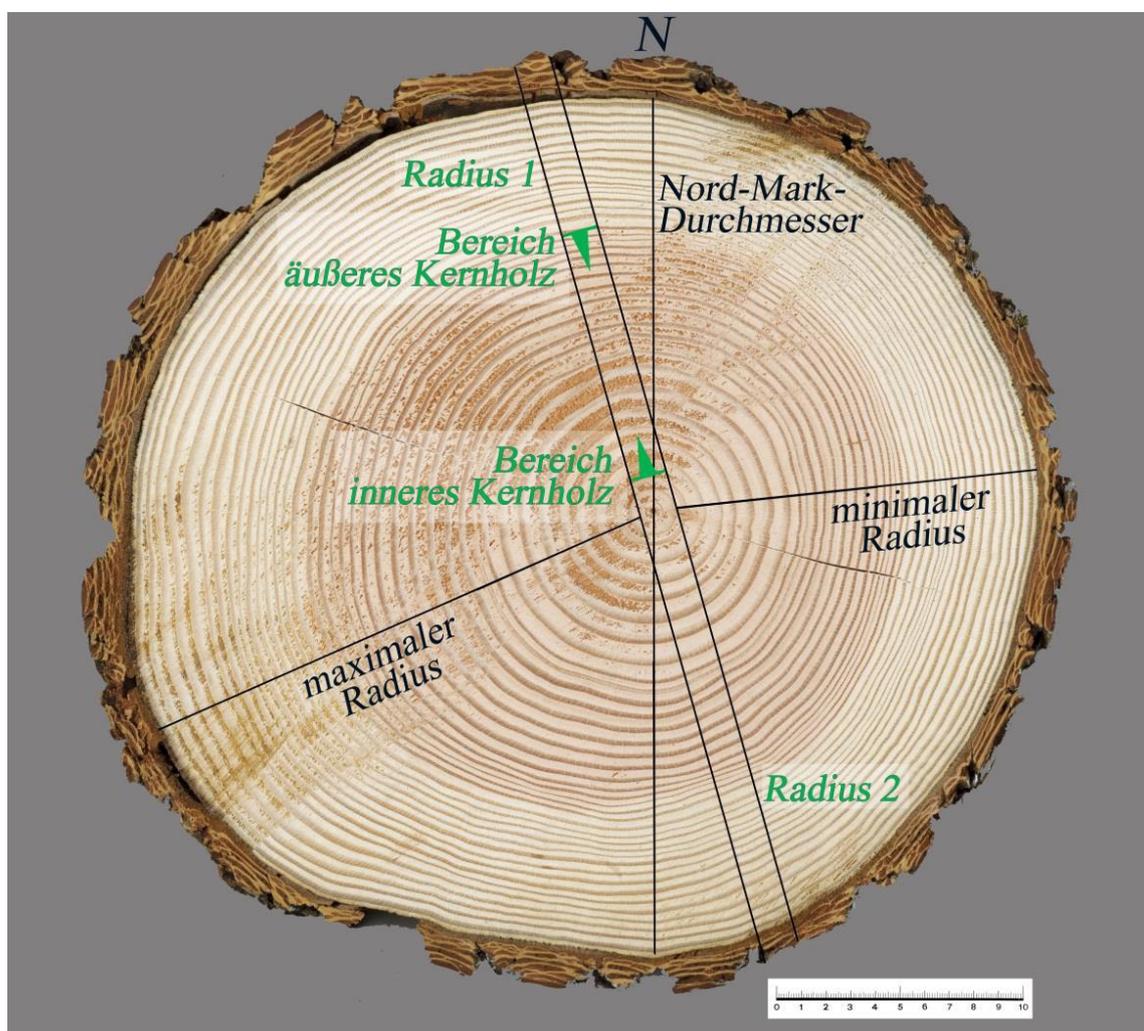
i) Gesamter Radius der Stammscheiben aus Brusthöhe:

- Bestimmung der Jahrringbreite und des Spätholzanteils,
- Bestimmung der lokalen radialen und tangentialen Tracheidendurchmesser
- Bestimmung der lokalen Rohdichte
- Bestimmung des lokalen Mikrofibrillenwinkels
- Berechnung der lokalen Tracheidenwanddicke
- Berechnung des lokalen Elastizitätsmoduls

Zur Bestimmung der Eigenschaften sollten nach einem ‚zufälligen System‘ extreme Bereiche ausgeschlossen werden, um beispielsweise Reaktionsholzeinflüsse zu minimieren. Auf den Stammscheiben wurden wie in Abbildung 6 dargestellt vom Mark ausgehend der minimale und maximale Radius identifiziert, und die in Tabelle 5 aufgelisteten winkelhalbierenden Radien ausgewählt. Für die Untersuchungen wurde der holzfehlerärmere Radius verwendet. Verglichen mit systematisch von der Nord-Markierung der Stammscheiben über das Mark gemessenen Durchmessern variierten die Durchmesser um 0 bis 8 % bei einer Variation der Ausrichtung von 1 bis 89 °. Die Bestimmung der Eigenschaften umfasste Kern- und Splintholz. Um bei der Darstellung von radialen Verläufen der Eigenschaften einen Bezug zum Lebensalter der Bäume herzustellen, wurden nicht die Jahrringanzahl in Brusthöhe, sondern das kambiale Alter zugrunde gelegt, das vom Fällungszeitpunkt ausgehend berechnet werden konnte, da die Keimungszeitpunkte der Bäume aus dem Standraumversuch bekannt waren. Abzüglich individuell in Brusthöhe gebildeter Jahrringe ergab sich eine Spanne von 4 bis 7 Jahren nach der Keimung, in denen die Bäume noch keine Höhe von 1,35 m erreicht hatten. Den jährlichen Werten radialer Messreihen einzelner Merkmale wurden die entsprechenden Lebensjahre zugeordnet, was eine Synchronisation nach dem kambialen Alter ermöglichte. Vom 8. bis zum

41. Lebensjahr gingen Jahrringbreiten aller 20 Bäume in die nach Lebensjahren synchronisierten Mittelwerte ein. Bis zum 7. Lebensjahr und ab dem 41. Lebensjahr variierte die Anzahl der in den Mittelwert eingehenden Messwerte, da die Bäume teilweise einerseits noch kleiner als 1,35 m waren (untere Lebensjahrgrenze) und sich andererseits die Lebensdauer unterschied (obere Lebensjahrgrenze). Da im Jahr 2012 lediglich Frühholz gebildet wurde, ging diese Zuwachszone nicht in die Ergebnisse ein.

Abbildung 6 Radius 1 und 2 des gewählten Durchmessers von Baum 122 aus Kandern, sowie minimaler und maximaler Radius. Lineal repräsentiert 10 cm. Aufnahme C. Waitkus, ergänzt.



Definierte Kernholzbereiche:

Die Probennahme erfolgte gemäß der metrischen Dimensionen von Prüfkörpern in radialer Richtung – zum Kambium hin (inneres Kernholz) bzw. auf das Mark zu (äußeres Kernholz). Während die untersuchten Radian systematisch entnommen wurden, umfasste die Probennahme für Untersuchungen der definierten Bereiche alle Himmelsrichtungen. Dennoch wurde angenommen, dass sich die verschiedenen Wachstumsmodelle auch so widerspiegeln.

- Bestimmung der Tracheidenlänge
- Bestimmung der Druckfestigkeit und des Druck-Elastizitätsmoduls
- Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls
- Bestimmung der Bruchschlagarbeit
- Bestimmung der Quellung
- Elektronenmikroskopische Untersuchungen
- Laborprüfungen zur natürlichen Dauerhaftigkeit
- Verkürzte Prüfung der natürlichen Dauerhaftigkeit
- Bestimmung des Extraktstoffgehaltes
- Bestimmung des Taxifolgehaltes
- Zelluläre UV-Vis-Mikrospektrometrie

Zur Untersuchung von juvenilem und adultem Kernholz wurden die extremen radialen Positionen gewählt:

- Inneres Kernholz: vom fünften Jahrring in Richtung des Kambiums, welches in Brusthöhe einem mittleren kambialen Alter von 7 ± 1 Jahren entspricht.
- Äußeres Kernholz: vom äußersten optisch erkennbaren Kernholzjahrring – im Mittel das $29. \pm 2$ Lebensjahr repräsentierend und 24 ± 3 Jahrringe vom Mark entfernt. Somit wurden 13 ± 2 Splintholz-Jahrringe nicht berücksichtigt.

Tabelle 5 Untersuchte Radien (fett) [cm] der 20 Bäume aus dem Standraumversuch mit Abweichungen der Ausrichtung [°] und des Durchmessers [cm] zu Nord-Mark-Durchmessern.

Standort	Baum	Nord-Mark	Abweichung zwischen Nord-Mark-		Gewählter	Radius 1	Radius 2
		Durchmesser	Durchmesser und gewähltem	Durchmesser			
		[cm]	[°]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
Lörrach	61	28	28	0,8	27	12,2	14,5
	454	43	12	-3,3	47	19,9	26,6
	576	53	1	1,9	51	25,4	25,8
	103	43	19	0,5	43	20,7	22,0
	78	35	24	0,6	35	17,8	16,8
Kandern	19	30	65	1,8	28	13,5	14,6
	122	36	9	0,8	35	17,5	17,4
	22	41	53	-0,7	42	21,3	20,8
	162	54	14	0,8	53	26,5	26,4
	222	44	37	-0,5	44	21,0	23,4
Ehingen	121	46	2	0,8	45	23,6	21,6
	221	37	21	0,9	36	16,8	19,5
	94	52	45	3,6	48	25,7	22,4
	203	44	38	-0,1	44	21,7	22,0
	120	23	20	0,8	22	11,6	10,5
Löwenstein	184	37	39	-0,5	38	19,5	18,0
	66	47	7	1,7	45	22,4	22,9
	366	42	34	1,1	41	20,1	21,0
	400	50	89	-1,5	51	24,3	26,7
	41	27	62	1,0	26	13,2	12,8

3.2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen umfassen anatomische, physikalische, mechanische und biochemische Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften juvenilen und adulten Holzes der Douglasie.

3.2.1 Bestimmung der Jahrringbreite

Vor der Messung wurde eine der radialen Kanten der Durchmesserriegel angeschnitten, um das Erkennen des Überganges von Früh- zu Spätholz innerhalb der Jahrringe zu begünstigen. Makroskopisch wurde für alle zehn Messschritte eine orientierende Markierung gesetzt. Insgesamt wurden an dem Holz aus dem Standraumversuch 730 Jahrringe vermessen, die in den Kalenderjahren bis 2011 gebildet wurden. Zudem wurden die vier älteren Bäume vermessen. Die Erfassung der Jahrringbreiten erfolgte bei 16facher Vergrößerung an einem Auflichtmikroskop in Verbindung mit einem Jahrringmessgerät (ANIOL 1987), welches bei einer Genauigkeit von 0,01 mm aufgenommene Werte mit der Software Catras (ANIOL 1983) auswertet. Im Falle des Vorhandenseins von Ästen wurde an Stellen gemessen, die makroskopisch betrachtet die geringste Störung des Faserverlaufes des Stammholzes zeigten. Um den Informationsgehalt der Ergebnisse zu steigern, erfolgte eine nach Früh-

und Spätholz getrennte Messung, aus der die jeweiligen Jahrringbreiten anschließend per Addition ermittelt wurden. Zur Abgrenzung von Spät- zu Frühholz dienten die Merkmale Zellwanddicke und Zellgröße, makroskopisch teilweise auch der farbliche Übergang zum dunkleren Spätholz. Zu jedem Radius wurden mindestens zwei Messreihen aufgenommen, die gemittelt wurden. Die Werte wurden aus dem Catras Format (*.cat) in das vom Microsoft Editor lesbare DendroDB Format (*.d, Simon Brewer, Université Paul Cézanne, Aix-en-Provence, France) transformiert und in Microsoft Excel überführt. Anschließend wurden die Früh- und Spätholzbreiten jedes Jahres addiert, woraus die Jahrringbreiten resultieren. Anhand forstlicher Information zu den Versuchsbäumen werden die Jahrringbreiten der Bäume nach Lebensjahren synchronisiert.

3.2.2 Bestimmung des Spätholzanteils

Wie bereits für die Messung der Jahrringbreiten beschrieben, wurden Früh- und Spätholzbreite getrennt aufgenommen, so dass der Spätholzanteil an der Jahrringbreite aus dem Verhältnis Spätholzbreite zu Jahrringbreite resultiert. Analog zu den Jahrringbreiten wurden die Spätholzanteile der Bäume nach dem kambialen Alter synchronisiert.

3.2.3 SilviScan-3-Untersuchungen

Das SilviScan-3-System ist ein automatisiertes Instrument zur schnellen Ermittlung von Holzmikrostruktur und -eigenschaften. Es besteht aus einer Bildanalyseeinheit, einem Röntgen-Diffraktometer und einem Röntgen-Dichtemesser, die kombiniert ein aussagekräftiges Paket primärer und sekundärer Daten generieren (persönliche Mitteilung EVANS, R. (18.04.2015): Silvican-3 measurements, e-Mail). Vor den Messungen wurden die Radien auf die Maße 2 x 7 mm² (tangential x longitudinal) zugeschnitten, mit Aceton extrahiert, getrocknet bei 40 % relativer Luftfeuchte und 20 °C, was in einer Gleichgewichtsfeuchte von circa 7 % resultierte, und mit Schleifpapier einer Körnung von 1500 geschliffen. Gemessene Daten wurden als Mittelwerte über die 2 mm tangentiale Probenbreite in einer radialen Ortsauflösung von 25 µm und jahrringweise als statistische Kenngrößen (Mittelwert, Median, Perzentile und Standardabweichung) für alle Merkmale ausgegeben. Die Mittelwerte der jahrringweisen Eigenschaften wurden ebenfalls nach dem kambialen Alter synchronisiert.

3.2.3.1 Bestimmung der lokalen radialen und tangentialen Tracheidendurchmesser

Zur Bestimmung der lokalen radialen (R) und tangentialen (T) Tracheidendurchmesser wurden die Proben auf einem im Rotationszentrum einer Drehscheibe montierten Linearmotor platziert. Ein computergesteuert fokussierendes Mikroskop, das mit einer ladungsgekoppelten (charge-coupled-device) Kamera ausgestattet ist, nahm kontinuierlich 1392 x 1040 Pixel messende 16 bit Bilder auf, bei einer Pixelgröße von 1,29 µm. Die Proben wurden durch Dioden beleuchtet, die von unterhalb der Oberfläche langwelliges Licht (840 nm) auf die Seiten der Proben emittierten. Dieses Licht verteilte

sich auf der Probenoberfläche und wurde an den Zellwänden geleitet, die so aus der geschliffenen Oberfläche hervortraten, während Lumina durch blockierenden Holzstaub relative dunkel blieben. Eine Software setzte die Bilder zusammen, binärisierte diese und maß die radialen und tangentialen Tracheidendurchmesser in 25 µm-Intervallen von der Rinde bis zum Mark, parallel zu den Jahringgrenzen.

3.2.3.2 Bestimmung der lokalen Rohdichte

Die lokale Rohdichte der Proben wurde als primäre Eigenschaft mittels Röntgenabsorption bestimmt. Vor den Messungen wurde die gravimetrische Rohdichte der Proben bestimmt, um die densitometrisch bestimmten Werte zu kalibrieren. Danach passierten die Proben, angetrieben durch einen Linearmotor im Rotationszentrum einer Drehscheibe, die eine rechtwinklige Ausrichtung der Holzstrahlen zum Röntgenstrahl ermöglichte, eine Kupfer-Feinfokus-Röntgenröhre in Brennpunktorientierung. Zur Optimierung der lokalen Auflösung war die Röntgenquelle (20 mA, -35 kV, Nickel-gefiltert) dabei fern der Probe montiert. Abhängig von der Häufigkeit von Störungen der Jahringausrichtung zeichnet eine Röntgenkamera (1392 x 1040 Pixel) in einem Schritt bis zu 7 mm des lokalen radialen Rohdichteprofiles auf, bei einer Pixelgröße von 6 µm. Die Röntgenstrahlungsintensität I_0 wurde unter Berücksichtigung von Rest-Polychromatie des 50 µm breiten Röntgenstrahles ($\lambda = 154$ pm) nach dem modifizierten Lambert-Beer'schen Gesetz in Rohdichte ρ umgerechnet:

$$\rho = \frac{1}{\mu_m d} \ln \frac{I_0}{I} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (1).$$

Mit der Dicke der Probe d und der transmittierten Intensität der Röntgenstrahlung I wird dem Effekt von Rest-Polychromatie des Röntgenstrahles auf den Massenschwächungskoeffizient μ_m Rechnung getragen. Lokal durch variierende Holzfeuchte beeinflusste Massenschwächungskoeffizienten werden als Fehlerquelle toleriert, da sich derartige Störungen nicht auf die lebensjährigen Rohdichtemittelwerte auswirken. Die Werte der Rohdichteprofile sind auf eine Holzfeuchte um 7 % zu beziehen und korrelieren in früheren Untersuchungen gut mit gravimetrisch bestimmten Rohdichten (LACHENBRUCH et al. 2010, EVANS & ILIC 2001).

3.2.3.3 Bestimmung des lokalen Mikrofibrillenwinkels

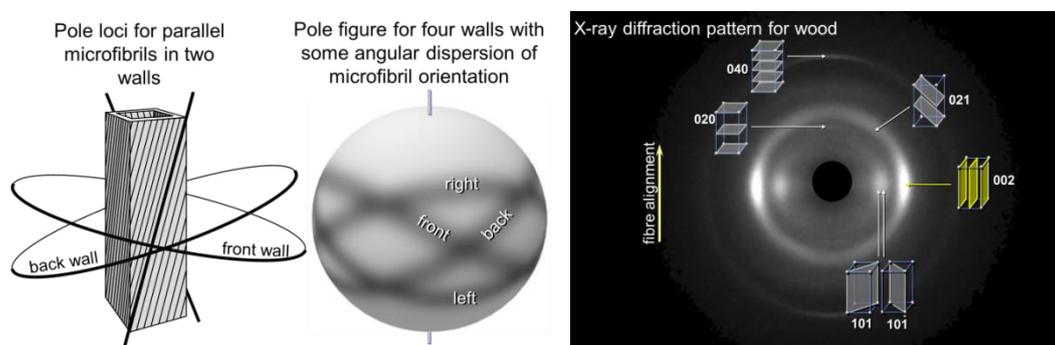
Die Messung des Mikrofibrillenwinkels basierte auf Röntgentransmissions-Pulverdiffraktometrie unter Nutzung einer Kupfer-Feinfokus-Röntgenröhre in Brennpunktorientierung. Der Nickel-gefilterte, gemäß der Bildanalyseinformation parallel zu den Jahringgrenzen ausgerichtete Röntgenstrahl (20 mA, -35 kV) fokussierte mittels einer parabolischen Kapillare 200 µm der Probe, wobei die Diffraktionsmuster von einer verstärkten CCD-Kamera mit konischer, röntgensensibler

Glasfaseroptik, die an eine weitere, wie zur Bildanalyse verwendete CCD-Kamera (1392 x 1040 Pixel) gekoppelt war, verbildlicht wurden. Der Mikrofibrillenwinkel MFA berechnet sich aus

$$MFA = \sqrt{2 (s_{azimuth\ profile}^2 - \sigma_{microfibril\ orientation}^2)} \quad [^\circ] \quad (2)$$

mit s als auflösungseingestellte Standardabweichung des Azimutprofils der Diffraktionsausschläge in der 002-Ebene und σ als lokale Standardabweichung der Mikrofibrillenorientierung, wie in Abbildung 7 dargestellt. Bei der Winkelmessung der kristallinen Cellulose der Sekundärwand S2 wirken Hemicellulosen und Lignin, die relativ desorientierte Primärwand, die Sekundärwände S1 und S2 und Parenchym als Grundrauschen. Der Mikrofibrillenwinkel wurde um Erweiterungen durch die Neigung der Tracheiden im Röntgenstrahl korrigiert, in 100 μm Intervallen bestimmt und in einer Auflösung von 25 μm den übrigen Profilen hinzugefügt. Für Winkel $< 90^\circ$ gilt, dass die Mikrofibrillen Z-förmig zur Zelllängsachse ausgerichtet sind, während Winkel $> 90^\circ$ eine S-förmige Ausrichtung repräsentierten.

Abbildung 7 Bestimmung des lokalen Mikrofibrillenwinkels $[^\circ]$ der 002-Ebene von kristalliner Zellulose anhand Röntgentransmissions-Pulverdiffraktometrie (aus EVANS 2014).



3.2.3.4 Berechnung der lokalen Tracheidenwanddicke

Die Tracheidenwanddicke tw wurde aus primären Ergebnissen der Bildanalyse und der Röntgendensitometrie abgeleitet. Dazu werden der radiale Tracheidendurchmesser R und der tangentielle Tracheidendurchmesser T ins Verhältnis zur lokal gemessenen Rohdichte ρ gesetzt:

$$tw = \frac{R+T}{4} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{16 R T}{(R+T)^2} \frac{\rho}{1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \right) \quad [\mu\text{m}] \quad (3).$$

Mit dem Quotienten aus lokaler Rohdichte zur Rohdichte reiner Zellwandsubstanz wird dem graduellen Unterschied zwischen Früh- und Spätholzdimensionen Rechnung getragen; der Quotient ist

als Prozentanteil interpretierbar und liegt bei lokalen Rohdichten von 143 und 1238 kg/m³ zwischen 10 und 83 %. Dabei wird die Rohdichte reiner Zellwandsubstanz wie von KOLLMANN (1951) vorgeschlagen mit 1500 kg/m³ angesetzt. Auch der andere Quotient aus 16 Zellquadraten und dem Quadrat des Umfanges der Zelle ist immer kleiner oder gleich 1 – der Ausdruck in der Klammer ist somit als Korrekturterm des geviertelten Halbzellumfanges anzusehen. Die berechneten Werte beinhalten die Mittellamelle, während Parenchym- und Epithelzellen ignoriert wurden.

3.2.3.5 Berechnung des lokalen Elastizitätsmoduls

Der lokale Elastizitätsmodul MOE wird aus der Röntgenabsorption und -diffraktion abgeleitet (persönliche Mitteilung EVANS, R. (18.04.2015): Silvican-3 measurements, e-Mail). Anhand der Beziehung

$$MOE = a \cdot vk_l^b \cdot \rho^c \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4),$$

worin vk_l der Variationskoeffizient des Intensitätsprofils der Röntgendiffraktion der 002-Ebene der Zellulose, ρ die lokale Rohdichte und a , b und c instrumentell kalibrierte Konstanten sind, stimmten die Werte bei einem Standardmessfehler von $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ mit durch Schallresonanz-Messungen bestimmten Elastizitätsmoduln überein.

3.2.4 Bestimmung der Tracheidenlänge

Aus dem inneren und äußeren Kernholzbereich aus Brusthöhe wurden mit einer Rasierklinge kleine, etwa 20 mm lange Späne präpariert und bei 16-facher Vergrößerung nach Früh- und Spätholz aufgetrennt. Es ergaben sich bei 20 Bäumen mit jeweils zu untersuchendem inneren und äußerem Früh- bzw. Spätholz insgesamt 80 Kollektive. Zur Mazeration der Holzspäne wurde die Methode nach FRANKLIN (1945) angewandt, welche die Einwirkung einer Lösung aus gleichen Teilen von 30 %igem Wasserstoffperoxid und 99-100 %igem Eisessig bei 60 °C für ± 72 Stunden in einem Heizmodul (Pierce Reacti-Therm III™ Heating/Stirring Module, Thermo Fisher Scientific Inc., Rockford, Illinois, USA) vorsieht. Nach Ablauf der Mazerationsdauer wurde das Material in Pyramidenbeuteln unter Leitungswasser gewaschen und mit einem Desintegrator (FibreLab Zubehör, Metso Automation Field Systems, Kajaani, Finnland) vereinzelt. Das Material wurde ungefärbt in Glycerin eingebettet und ein repräsentativer Umfang von mindestens 50 Tracheiden pro Probe (HAPLA & SABOROWSKI 1987) manuell lichtmikroskopisch (BX51 und BX UCB, Olympus Corporation, Tokyo, Japan mit Software Cell^F 2.5) vermessen. Im jeweiligen Bildausschnitt wurde zunächst optisch überprüft, ob die Tracheiden intakt waren. Anschließend wurden alle intakten Tracheiden vermessen und insbesondere darauf geachtet, längere Tracheiden nicht zu bevorzugen. Von einer zunächst angestrebten, automatisierten Messung der Tracheidenlänge mit einem Zellstoffmessgerät (FibreLab, Metso Automation Field Systems, Kajaani, Finnland) musste abgesehen werden, da sich bei der

automatisierten Messung signifikant andere Verteilungen und Mittelwerte ergaben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Zellstoffmessgerät die Länge aller vorhandenen Partikel aufnahm: ein hoher Anteil von primären und sekundären Feinstoffen/„fines“ (SETH 2003) verfälschte die Messungen und ließ sich rechnerisch nicht absondern.

3.2.5 Bestimmung der Druckfestigkeit und des Druck-Elastizitätsmoduls

In Anlehnung an DIN 52185 (1976) wurden die Druckfestigkeit und der Druck-Elastizitätsmodul parallel zu Faser geprüft. Da nicht alle 20 Bäume in die Untersuchung einbezogen werden konnten, galt es einerseits eine repräsentative Zusammenstellung aus dem zur Verfügung stehenden Material zu wählen, die kontrastierende Wuchsmodelle berücksichtigte. Diese Anforderungen erfüllend, wurden die in Tabelle 6 aufgelisteten acht Bäume ausgewählt und die inneren und äußeren Kernholzbereiche definiert. Dasselbe Material wurde auch zur Untersuchung der Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit verwendet.

Tabelle 6 Zur Bestimmung der Druckfestigkeit, Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit ausgewählte Bäume, Durchmesser [cm] und Parallelenanzahl.

Standort	Baum	BHD [cm]	Wuchsmodell	Anzahl Prüfkörper					
				Druck		Biegung		Bruchschlagarbeit	
				innen	außen	innen	außen	innen	außen
Kandern	19	28,2	langsam	10	10	6	6	6	6
Lörrach	78	34,6	langsam	10	10	6	6	6	6
Lörrach	454	42,7	schnell-langsam	10	10	6	6	6	6
Ehingen	203	43,7	langsam-schnell	10	10	6	6	6	6
Kandern	222	44,4	langsam-schnell	10	10	6	6	6	6
Löwenstein	66	45,3	schnell-langsam	10	10	6	6	6	6
Ehingen	94	48,1	schnell	10	10	6	6	6	6
Löwenstein	400	51,0	schnell	10	10	6	6	6	6
		42 ± 7,4		80	80	48	48	48	48

Da die radialen und tangentialen Dimensionen aller Prüfkörper 20 mm betragen, konnten Leisten dieses Querschnittes aus Seitenware der Stammstücke mit Maßzugabe geschnitten, abgerichtet und zunächst im Normklima klimatisiert werden. Nach der Klimatisierung folgte das Hobeln auf 20 x 20 mm² Querschnitt und das Aushalten aller Prüfkörper in den Maßen 20 x 20 x 45 mm³ (radial x tangential x longitudinal). Nach DIN 52185 (1976) soll die longitudinale Dimension das 1,5 bis 3-fache Maß der radialen bzw. tangentialen Dimension betragen. Aufgrund von begrenzt zur Verfügung stehendem Material wurde der Faktor 2,25 gewählt. Vor der Prüfung wurden die Prüfkörper im Normklima bei 20 ± 1 °C und 65 ± 3 % relativer Luftfeuchte gelagert. Mit erreichter Gewichtskonstanz folgte die Bestimmung der Prüfkörpergewichte m_u (LP3200D, Genauigkeit ± 0,002 g, Sartorius AG, Göttingen) sowie der radialen, tangentialen und longitudinalen Maße r_u , t_u

und l_u auf 0,1 mm (IP67, Genauigkeit $\pm 0,04$ mm, Tesa SA, Renens, Switzerland). Hieraus wurde das Prüfkörpervolumen V_u zu

$$V_u = r_u * t_u * l_u \quad [\text{m}^3] \quad (5)$$

und die Rohdichte der Prüfkörper im Normalklima ρ_u zu

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (6).$$

berechnet. Außerdem wurde die mittlere Jahrringbreite der Prüfkörper bestimmt. Dazu wurde die senkrecht zu den Jahrringgrenzen summierte Jahrringbreite aller vollständig im Prüfkörper enthaltenen Jahrringe gemessen und ins Verhältnis zur Anzahl dieser Jahrringe gesetzt. Insbesondere die inneren Kernholzbereiche zeigten dabei häufig weniger Jahrringe, als die nach DIN 52185 (1976) geforderte Anzahl von fünf Zuwachszonen, doch aufgrund des limitierten Materials konnten die Prüfkörper nicht größer dimensioniert werden. Die grobe Jahrringstruktur wurde zudem als charakteristisch für das untersuchte innere Holz angesehen.

Tabelle 7 Prüflparameter zur Bestimmung von Festigkeit und Elastizitätsmodul bei Druck- und Biegebelastung.

	Druckprüfung	Biegeprüfung
Kraftmessdose	50.000 N (Xforce K)	5.000 N (Xforce HP)
Wegmessung	Makroaufnehmer, $l_0 = 25$ mm	Traversenmessung, $l = 300$ mm
Berechnung des Elastizitätsmoduls	10 - 40 % F_{\max}	10 - 40 % F_{\max}
Vorkraft	20 N	2 N
Geschwindigkeit	0,8 mm/min	7 mm/min
Kraftabschaltswelle	10 % F_{\max}	50 % F_{\max}
Anzeigeabweichung	< 1 % ab 0,1 % der Nennkraft, < 0,25 % ab 0,4 % der Nennkraft	

Die Prüfmaschine (Zwick-Roell Z050, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) wurde auf die in Tabelle 7 definierten Parameter eingestellt und das Material unter Druck bis zur Maximalkraft getestet. Hierbei kamen zusätzlich installierte Makro-Wegaufnehmer zum Einsatz, da die durch den Kraftangriff hervorgerufene Kompression der Prüfkörper marginal war. Nach der Prüfung wurden die Prüfkörper bei 103 °C gedarrt, die Darrgewichte der Prüfkörper m_0 bestimmt und die aus dem Normalklima resultierende Holzfeuchte u berechnet:

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} * 100 \quad [\%] \quad (7).$$

Zur Berechnung der Druckfestigkeit σ_D wurde die von der Prüfmaschine aufgenommene Maximalkraft F_{\max} auf die Querschnittsfläche eines Prüfkörpers bezogen:

$$\sigma_D = \frac{F_{max}}{r_u * t_u} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (8).$$

Der Druck-Elastizitätsmodul E_D wurde zunächst von der Prüfmaschine als Verhältnis aus Spannung σ_D zur elastischen Verformung ε_D im Bereich von 10 bis 40 % der Maximalkraft zu

$$E_D = \frac{\Delta\sigma_D}{\varepsilon_D} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (9).$$

berechnet. Das zur Berechnung des Druck-Elastizitätsmoduls definierte Segment des Spannungs-Verformungsgraphen wurde individuell überprüft und vereinzelt angepasst.

3.2.6 Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls

Basierend auf DIN 52186 (1978) wurde die Biegeprüfung als Dreipunktbiegung durchgeführt. Zur Bestimmung der Biegefestigkeit wurden 96 Prüfkörper derselben acht Bäume verwendet, wie zur Druckprüfung in Tabelle 6 aufgelistet. Die radiale Dimension r und tangential Dimension t der Prüfkörper beträgt 20 mm – aufgrund dessen berechnet sich das longitudinale Maß zu 360 mm, bestehend aus der Stützweite $l = 15 \times t$ und den 2 Auflagern á $1,5 \times t$. Unter Ausschluss von fehlerhaften Bereichen insbesondere im inneren Kernholzbereich reichte das Material nur aus, um sechs Prüfkörper pro Bereich zu testen. Dabei wurden z. B. Äste in den Auflagern zugelassen. Die Prüfkörper lagerten bis zur Gewichtskonstanz im Normalklima ($20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $65 \pm 3 \text{ \% r.L.}$). Vor der anschließenden Prüfung wurden die radialen und tangentialen Dimensionen der Prüfkörper in der Mitte der longitudinalen Dimension auf 0,1 mm genau bestimmt (IP67, Genauigkeit $\pm 0,04 \text{ mm}$, Tesa SA, Renens, Switzerland). Wie für die Prüfkörper zur Druckfestigkeit wurde die mittlere Jahrringbreite der im Probenquerschnitt enthaltenen Jahrringe berechnet. Die Prüfmaschine (Zwick-Roell Z050, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) wurde auf die in Tabelle 7 genannten Parameter eingestellt, die Prüfkörper mit den Radialflächen nach oben mittig unter dem Kraftstempel ausgerichtet, ein Hartholzreiter mit gerundeten Kanten positioniert, der Kraftstempel bis zur Maximalkraft F_{max} gefahren und die Prüfung nach Abfall der aufgenommenen Kraft bei 50 % der Maximalkraft beendet. Zur Auswertung wurden die Bruchflächen den Attributen lang- oder kurzfasriger Bruch zugeordnet. Für die Bestimmung der Rohdichte (Formel 6) wurde die Bruchfläche eines der beiden Bruchstücke abgesägt und ein würfelförmiger Abschnitt longitudinal vermessen und gewogen (LP3200D, Genauigkeit $\pm 0,002 \text{ g}$, Sartorius AG, Göttingen). Das andere Bruchstück wurde – noch immer im Normalklima – gewogen, gedarrt, abermals gewogen und die Holzfeuchte (Formel 7) bestimmt. Da die aus dem Kraftangriff resultierende Durchbiegung der Prüfkörper wesentlich größer als die Druckkompression ist, konnte den Berechnungen der Traversenweg zugrunde gelegt werden. Die Biegefestigkeit eines Prüfkörpers bei mittigem Kraftangriff berechnete sich zu

$$\sigma_B = \frac{3 F_{max} l}{2 r t^2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (10).$$

Der Biege-Elastizitätsmodul E_B wurden analog zum Druck-Elastizitätsmodul (Formel 9) berechnet.

3.2.7 Bestimmung der Bruchschlagarbeit

Die 96 Prüfkörper zur an DIN 52189 (1981) angelehnten Bestimmung der Bruchschlagarbeit stammen von den auch für die Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser und die Biegefestigkeit ausgewählten Bäumen (Tabelle 6). Im Querschnitt messen die Prüfkörper 20 x 20 mm², während die longitudinale Dimension 300 mm beträgt. Im auf jeder Seite 30 mm messenden Bereich der Auflager wurden etwaige Holzfehler zugelassen, um die Materialausbeute zu begünstigen. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz im Normalklima (20 ± 1 °C, 65 ± 3 % r.L.) wurden die Querschnittsflächen in der Mitte der longitudinalen Dimension auf 0,01 mm bestimmt. Es folgte die Prüfung (Pendelschlagwerk No. 662, Mannheimer Maschinenfabrik Mohr & Federhaff AG, Mannheim) mit Anzeige des vom Prüfkörper aufgenommenen Kraftmomentes innerhalb eines Wertebereiches von 1 bis 15 mkg, das unter zugrunde legen einer Erdbeschleunigung von 9,80665 N/kg in Bruchschlagarbeit umgerechnet wurde. Anschließend wurden die Bruchflächen charakterisiert nach den Merkmalen kurz- oder langfaseriger Bruch. Nächstmöglich zur Bruchstelle wurde aus einem Bruchstück ein Würfel ausgeschnitten, dessen Dimensionen (IP67, Genauigkeit ± 0,04 mm, Tesa SA, Renens, Switzerland) und Gewicht (LP3200D, Genauigkeit ± 0,002 g, Sartorius AG, Göttingen), und daraus die Rohdichte (Formel 8) bestimmt wurde. Nach einer Wägung des anderen Bruchstückes im Normalklima und anschließendem Darren bei 103 ± 2 °C wurde die zur Rohdichte korrespondierende Holzfeuchte (Formel 7) errechnet.

3.2.8 Bruchflächencharakterisierung

Für die morphologische Charakterisierung von Bruchflächen der Prüfkörper zur Bestimmung der Biegefestigkeit und der Bruchschlagarbeit wurden jeweils zwei repräsentative Proben ausgewählt. Die vollständigen Bruchflächen wurden präpariert, mit Leit-C-Kohlepaste auf Probenhalter geklebt und in einem Exsikkator über Kieselgel mit Indikator getrocknet. Anschließend wurden die Proben für 200 Sekunden bei 20 mA und 0,08-0,06 mbar mit Gold bedampft (Bio-Rad SC510 Sputter Coater, Quorum Technologies Ltd., East Sussex, UK, Target, Agar Scientific/Elektron Technology, Cambridge, UK). Mit einem Feldemissionsrasterelektronenmikroskop (Quanta FEG 250, FEI Company, Eindhoven, Netherlands) wurden die Bruchflächen im Vakuum bei Spannungen von 2-7 kV und 25 bis 130-facher Vergrößerung untersucht. Die Steuer- und Aufnahmesoftware (xT microscope Server) speicherte digitale Bilder direkt im tif-Format.

3.2.9 Bestimmung der Quellung

Die Quellung wurde basierend auf DIN 52184 (1979) an den Bäumen des Wachstumsmodells ‚BHD 40‘ bestimmt. Die Wahl fiel auf diese Stämme, da zwar die Durchmesser mit im Mittel $34 \pm 4,9$ cm ähnlich waren, jedoch Standort und Pflanzverband variierten. Aus den Stammabschnitten wurde jeweils eine den inneren und eine den äußeren Kernholzbereich repräsentierende Leiste des Querschnittes 20×20 mm² plus Maßzugabe geschnitten. Nachdem die Leisten im Normalklima (20 ± 1 °C, 65 ± 3 % r.L.) klimatisiert waren, erfolgten das Hobeln auf 20×20 mm² und der Einschnitt von je Bereich zehn Parallelen auf longitudinal ebenfalls 20 mm. Zur Messung der Prüfkörperdimensionen an wiederfindbaren Punkten wurde auf je einer longitudinalen, radialen und tangentialen Seite eine Markierung aufgezeichnet. Nachdem sich die Gewichte des Materials im Normalklima um nicht mehr als 0,1 % änderten, wurden die Prüfkörper auf 0,01 mm genau vermessen (IP65, Genauigkeit $\pm 0,001$ mm, Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japan) und auf 0,001 g genau gewogen (LP3200D, Genauigkeit $\pm 0,002$ g, Sartorius AG, Göttingen). Nach Berechnung der Klimavolumina und -rohddichten (Formeln 5 und 6) der Prüfkörper war der erste Klimaschritt absolviert, worauf die Parallelen 0 – 4 der Bereiche ins Trockenklima bei 20 °C und 35 % relativer Luftfeuchte wechselten, während die Parallelen 5 – 9 im Feuchtklima bei 20 °C und 85 % relativer Luftfeuchte lagerten. Nach abermaligem Erreichen von Gewichtskonstanz wurden Maße und Gewichte aufgenommen und die Parallelen vertauscht, so dass nun Parallelen 0 – 4 im Feucht- und Parallelen 5 – 9 im Trockenklima lagerten. Anschließend an das erneute Messen klimaspezifischer Maße und Gewichte wurden alle Prüfkörper bei 103 °C gedarrt und nach dem Abkühlen in Exsikkatoren über Phosphorpentoxid erst gewogen und danach vermessen. Zur Auswertung wurde in den anatomischen Hauptrichtungen das lineare Quellmaß α von darrtrocken zu aus den Klimata resultierenden Holzfeuchten berechnet, wie am Beispiel des radialen linearen Quellmaßes α_r :

$$\alpha_r = \frac{r_u - r_0}{r_0} * 100 \quad [\%] \quad (11).$$

Dabei war r_0 das radiale Maß eines Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand und r_u das Maß des Prüfkörpers im feuchten, gequollenen Zustand gemäß der drei Klimata. Analog wurden das longitudinale α_l bzw. tangentiale α_t lineare Quellmaß berechnet, wenngleich die longitudinale Quellung an Prüfkörpern von 20 mm Kantenlänge nur zur Orientierung erfasst werden konnte. Die Volumenquellung berechnete sich zu

$$\alpha_V = \frac{(100 + \alpha_l) * (100 + \alpha_r) * (100 + \alpha_t)}{10^4} - 100 \quad [\%] \quad (12).$$

Zudem wurde die differentielle Quellung q in radialer bzw. tangentialer Richtung bestimmt

$$q_r = \frac{r_{20/85} - r_{20/35}}{r_{20/0} (u_{20/85} - u_{20/35})} * 100 \text{ [%/\%]} \quad (13).$$

Dabei stehen $r_{20/85}$, $r_{20/35}$ und $r_{20/0}$ für die radialen Dimensionen der Prüfkörper im feuchten, trockenen und absolut trockenen Klima, während $u_{20/85}$ und $u_{20/35}$ die aus dem Feucht- und Trockenklima resultierenden Holzfeuchten bedeuten. Außerdem wurde der aus den Klimata resultierende Wassergehalt w der Prüfkörper berechnet, wobei m_u für die darrtrockene Prüfkörpermasse und m_0 für die Prüfkörpermasse in den Klimata steht.

$$w = \frac{m_u - m_0}{m_u} * 100 \text{ [...]} \quad (14).$$

Die differentielle Quellung bietet als Ableitung der linearen Quellung nach der Holzfeuchte darüber Aufschluss, um welchen Anteil sich die Prüfkörperdimensionen bei einer Holzfeuchteänderung um 1 % ändern. Das Verhältnis der differentiellen tangentialen Quellung zur differentiellen radialen Quellung, die Quellungsanisotropie A_q , lässt Schätzungen zu Verwerfungen von Schnittholz zu.

3.2.10 Laborprüfungen zur natürlichen Dauerhaftigkeit

In Anlehnung an DIN 350-1 (1994) und DIN 113 (1996/prA1 2003) wurden Laborprüfungen zur natürlichen Dauerhaftigkeit gegen Holzabbau durch Basidiomyceten durchgeführt. Im Herbst 2012 wurde Holz der Standorte Lörrach und Kandern geprüft und im Winter 2013 das Holz der Standorte Ehingen und Löwenstein, ergänzt um überschüssiges Holz aus der ersten Prüfung. Unterschiede zwischen den Prüfungen sind an den entsprechenden Stellen beschrieben.

Die Vorbereitung der Prüfung erforderte genaue Zeitplanung und parallele Materialvorbereitung, damit zum Einsetztermin sowohl die Basidiomyceten als auch das Holz bereit waren. Das Nährmedium für die Basidiomyceten war ein Gemisch aus 4 % Malzextrakt (Artikel No. 1.05391.9025, Charge Nr. VM 3079110 427, Merck KGaA, Darmstadt) und 2 % Agar (CERO AGAR, Bacto hochrein, Typ 8904-72, Batch Nr. 43.514.01, C.E. Roeper GmbH 1999, Hamburg), das mit Leitungswasser der Härte 2 aufgefüllt wurde. Dieses Leitungswasser wies Mineralien- und Spurenelementgehalte auf, die den Werten des in DIN 113 (1996/prA1 2003) geforderten Wassers des Grades 3 nach ISO 3696 (1987) sehr ähnlich sind. Deshalb können die Wachstumsbedingungen der Basidiomyceten mit normgerechten Bedingungen verglichen werden. Zur Gewinnung von aktivem Mycel, das nicht älter als 4 Wochen ist, wurde kalt angesetztes Nährmedium, das zuvor in mit Watte verschlossenen Erlenmeyerkolben für 25 Minuten bei 121 °C autoklaviert (3870 ELV, Systec GmbH, Wetztenberg und LVSA 50/70, Zirbus Apparate- und Maschinenbau GmbH, Bad Grund) wurde, unter sterilen Bedingungen in 20 ml Portionen in Petrischalen (Ø 10 cm, Polysterol) gefüllt. Nach dem Erkalten und Erstarren des Nährmediums wurden mit einem Korkbohrer 79 mm² (Ø 10 mm) große

Impfflocken ausgestochen und mittig auf dem Nährmedium platziert. Die eingesetzten Basidiomyceten waren:

- *Coniophora puteana* (Schumacher ex Fries), Karsten (Stamm BAM Ebw. 15), Brauner Kellerschwamm, im Folgenden *C. puteana* (*Cp*) genannt,
- *Poria placenta* (Fries), Cooke sensu J. Eriksson (Stamm FPRL 280), Rosafarbener Saftporling, kurz *P. placenta* (*Pp*). Der aktuelle Name dieses Basidiomyceten ist *Oligoporus placenta* (Fries 1861) Gilbert et Ryvarden – orientiert an den Normen wird der Name *Poria placenta* verwendet.
- *Gloeophyllum trabeum* (Persoon ex Fries), Murrill, (Stamm BAM Ebw. 109) Balkenblättling, als *G. trabeum* (*Gt*) abgekürzt, und
- *Coriolus versicolor* Linneus, Quélet (Stamm CTB 863 A), Schmetterlings-Tramete, kurz *C. versicolor* (*Cv*).

Die Prüfungen umfassten somit drei Braunfäuleerreger (*Cp*, *Pp*, *Gt*) und einen Weißfäuleerreger (*Cv*), die alle in DIN 113 (1996/prA1 2003) zur Verwendung genannt werden. Dabei gilt *C. puteana* als in jedem Fall obligatorisch, während *P. placenta* und *G. trabeum* als obligatorisch für die Wirksamkeitsprüfung von anderen Holzschutzmitteln als Teeröle oder ähnliche Erzeugnisse an Nadelholz empfohlen werden. *C. versicolor* wird auch zur Prüfung von Laubholz für spezielle Gefahren als obligatorisch genannt. Bis die Petrischalen vollständig mit aktivem Mycel bewachsen waren, dauerte es bei 22 ± 2 °C und 70 ± 5 % relativer Luftfeuchte in einem dunklen Brutraum für *C. puteana* und *G. trabeum* drei, und für *P. placenta* und *C. versicolor* zwei Wochen. Die sterile Beimpfung der Rundgefäße ($\varnothing = 10,5$ cm) mit frischen Mycel erfolgte, nachdem diese zuvor mit heiß angesetztem Nährmedium zu je 60 ml befüllt und bei leicht geöffnetem Deckel autoklaviert wurden. Bereits beim Abimpfen des aktiven Mycels von *C. versicolor* mussten Fächerscheiben eingesetzt werden, da es im Falle eines Einsetzens zusammen mit dem Prüfkörper zu Verzögerungen des Angriffes auf das Holz kommen kann. Es vergingen wieder die genannten Zeiträume, bis die Rundgefäße vollständig bewachsen waren. Vor dem Zuschnitt des Holzes wurden die Geräte und Maschinen gereinigt, um zu verhindern, dass Stoffe wie z.B. Gleitmittel das Prüfergebnis beeinflussen. Es wurden zunächst zwei parallele Latten des Querschnittes 25×15 mm² zuzüglich einer Maßzugabe zum Abrichten und Hobeln sowie eine Leiste variierenden Restmaßes gesägt. Jeweils die ersten 5 cm des Hirnholzes wurden verworfen und anschließend fehlerfreie Prüfkörper definiert. DIN 113 (1996/prA1 2003) fordert einerseits parallel zur Faser verlaufende Längsflächen und weist lediglich tangential zu den breiten Längsflächen ausgerichtete Jahrringe zurück. Des Weiteren darf das Holz keine Risse, Äste, Verfärbungen oder andere Fehler haben, weshalb solche Abschnitte verworfen wurden. Insgesamt gliederten sich die Prüfkörper in vier Gruppen, wie in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 In den Laborprüfungen zur natürlichen Dauerhaftigkeit verwendete Prüfkörper aus innerem und äußerem Douglasien-Kernholz und Referenzprüfkörper aus *Pinus sylvestris* (*Ps*), *Fagus sylvatica* (*Fs*).

	Prüfkörper mit Basidiomyceten- angriff (mB)	Prüfkörper ohne Basidiomyceten- angriff (oB)	Feuchtekrollen (FK)	Referenzprüfkörper (RP)
1. Prüfung				
Basidiomyceten	3 <i>Cp, Pp, Gt</i>	-	-	3 <i>Cp, Pp, Gt</i>
Standorte	2 Lörrach/ Kandern	2 Lörrach/ Kandern	2 Lörrach/ Kandern	
Bäume	5 <i>P. menziesii</i>	5 <i>P. menziesii</i>	5 <i>P. menziesii</i>	<i>P. sylvestris</i>
Bereiche	2 innen/außen	2 innen/außen	2 innen/außen	
Parallelen	6	2	2	10
Gesamt	360	40	40	30
2. Prüfung (zuzüglich vier Bereichen von Bäumen aus Lörrach und Kandern)				
Basidiomyceten	3 <i>Cp, Pp, Cv</i>	-	-	3 <i>Cp, Pp, Cv</i>
Standorte	2 Ehingen/ Löwenstein	2 Ehingen/ Löwenstein	2 Ehingen/ Löwenstein	
Bäume	5 <i>P. menziesii</i>	5 <i>P. menziesii</i>	5 <i>P. menziesii</i>	<i>P. sylvestris</i> / <i>F. sylvatica</i>
Bereiche	2 innen/außen	2 innen/außen	2 innen/außen	
Parallelen	6	2	2	10 3 x 10 <i>Ps</i> und 1 x 10 <i>Fs</i>
Gesamt	360	40	40	40

Die Prüfkörper der drei erstgenannten Gruppen stammten aus dem inneren und äußeren Kernholz der Douglasien, die Prüfkörper der letztgenannten Gruppe waren aus Kiefern-Splintholz (*Pinus sylvestris* L.) und – ausschließlich zur Prüfung mit *C. versicolor* – aus Buche (*Fagus sylvatica* L.):

- Prüfkörper, die einem Angriff durch Basidiomyceten ausgesetzt waren (mB/*P. menziesii*) zur Ermittlung des individuellen Masseverlustes durch Holzabbau der Basidiomyceten.
- Prüfkörper, die keinem Angriff durch Basidiomyceten ausgesetzt waren (oB/*P. menziesii*); analoge Behandlung zu Prüfkörpern mit Angriff durch Basidiomyceten, allerdings ohne Beimpfung. Nach DIN 113 (1996/prA1 2003) sollen pro Baum und Bereich mindestens vier gleichartige Prüfkörper einbezogen werden; aufgrund von Materialknappheit konnten lediglich zwei Parallelen realisiert werden, die im Vergleich zu den Feuchtekrollen weniger den Anforderungen an Prüfkörper genügen.
- Prüfkörper zur Bestimmung der Klimafeuchte (Feuchtekrollen, FK/*P. menziesii*) zur Bestimmung einer aus der Klimlagerung resultierenden mittleren Holzfeuchte der jewei-

ligen Bereiche. Abweichend von DIN 350-1 (1994) wurden statt mindestens drei Prüfkörpern nur zwei Prüfkörper je Baum und Bereich eingesetzt.

- Referenzprüfkörper (RP/*P. sylvestris* Splintholz und *F. sylvatica*) zur Beurteilung der Virulenz der Basidiomyceten und zur Bestimmung der Dauerhaftigkeitsklasse des Douglasien-Kernholzes.

Die Douglasien-Prüfkörper wurden für vier Wochen in einem Klimaraum (20 ± 2 °C, 65 ± 3 % r.L.) gelagert, so dass die Maße bei resultierender 12 ± 1 % Holzfeuchte $50 \pm 0,5$ (longitudinal) x $25 \pm 0,5$ (radial) x $15 \pm 0,5$ (tangential) mm³ betragen. Nach der Klimalagerung wurden für alle Douglasien-Prüfkörper die Klimagewichte $m_{Klima}(mB, oB, FK)$ ermittelt (SI-603, Genauigkeit $\leq \pm 0,002$ g, Denver Instrument, Bohemia, New York, USA) und die Klimavolumina der Feuchtekontrollen $V_{Klima}(FK)$ gemessen (500-161U, Genauigkeit $\pm 0,04$ mm, Mitutoyu Corporation, Kawasaki, Japan). Anschließend wurden die Feuchtekontrollen zusammen mit den Kiefern-Splintholz-Referenzen für 24 Stunden bei 103 ± 2 °C gedarrt. Nach dem Abkühlen in Exsikkatoren über Kieselgel mit Indikator (Orange-Gel 101969, Granulat ~1-3 mm, Merck KGaA, Darmstadt) lieferte abermalige Wägung die Darrgewichte für die Feuchtekontrollen $m_0(FK)$ und Referenzprüfkörper $m_0(RP)$. Für die Feuchtekontrollen wurden zusätzlich die Darrvolumina $V_0(FK)$ bestimmt. Aus diesen Größen konnte nun repräsentativ für jeden Bereich eine aus den Klimabedingungen resultierende, mittlere Holzfeuchte

$$\overline{u_{Klima}(FK)} = \frac{1}{n} \sum \frac{m_{Klima}(FK) - m_0(FK)}{m_0(FK)} * 100 \quad [\%] \quad (15)$$

ermittelt werden. Ebenso wurde die Rohdichte der Prüfkörper zur Bestimmung der Klimafeuchte einerseits resultierend aus dem Normalklima (20 ± 2 °C, 65 ± 3 % r.L.), andererseits im darrtrockenen Zustand berechnet:

$$\overline{\rho_{Klima bzw. 0}(FK)} = \frac{1}{n} \sum \frac{m_{Klima bzw. 0}(FK)}{V_{Klima bzw. 0}(FK)} \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (16).$$

Nachfolgend wurden die Referenzprüfkörper und die Douglasien-Prüfkörper in Polyethylenfolie eingeschweißt und zur Sterilisation durch Cobalt-60- γ -Bestrahlung verschickt (BBF Sterilisationsservice GmbH, Kernen-Rommelshausen), um den Eintrag von Fremdorganismen auszuschließen. Bei der Sterilisation zur ersten Prüfung betrug die Strahlungsdosis 31,2 kGy, die Sterilisation zur zweiten Prüfung erfolgte bei 33,7 kGy. Auf einer V4a-Stahl Fächerscheibe von 26 mm Durchmesser nach Vorgabe von DIN 6798 (1988), die durch eine Höhe von weniger als 3 mm einen direkten Feuchtigkeitsübergang vom Nährboden auf das Holz verhinderte, wurden jeweils zwei

Parallelen eines Bereiches unter sterilen Bedingungen in die Rundgefäße eingesetzt. Zur Sauerstoffversorgung der Basidiomyceten wurden die dichtunglosen Deckel der Rundgefäße vom verschlossenen Zustand um eine Viertelumdrehung zurückgedreht. Während der 16-wöchigen Expositionsdauer lagerten die Gefäße im durch DIN 113 (1996/prA1 2003) definierten Brutklima bei Dunkelheit, $22 \pm 2 \text{ °C}$ und $70 \pm 5 \%$ relativer Luftfeuchte. Am Ende der Prüfung sind gemäß DIN 113 (1996/prA1 2003) Auffälligkeiten zu dokumentieren, wie einen Bewuchs der Prüfkörper durch Wandkontakt des Mycels, gehemmtes Wachstum der Basidiomyceten oder Fremdinfektionen. Gewohnte Praxis dauerhaftigkeitsprüfender Labore ist die Bonitierung der Bewuchsfläche und -dichte jedes Prüfkörpers anhand der in Tabelle 9 gezeigten ordinalen Skala.

Tabelle 9 Bonitierung des Bewuchses der Probenmantelfläche [%] und der Dichte des Mycels [deskriptiv]

Bewuchs der Probenmantelfläche		Dichte des Mycels	
0	nicht bewachsen	0	nicht bewachsen
1	0 – 33 %	1	dürrtig bewachsen
2	34 – 66 %	2	normal bewachsen
3	67 – 99 %	3	dicht bewachsen
4	vollständig überwachsen	–	–

Nachdem die Prüfkörper von oberflächlich anhaftendem Mycel befreit wurden, folgte die direkte Bestimmung des Endgewichtes $m_{u\text{ Ende}}$, um eine Veränderung der Holzfeuchte auszuschließen (E2000D, Genauigkeit $\pm 0,002 \text{ g}$, Sartorius AG, Göttingen). Danach wurden die Prüfkörper 24 Stunden bei $103 \pm 2 \text{ °C}$ gedarrt, in Exsikkatoren abgekühlt und die Darrgewichte $m_{0\text{ Ende}}$ bestimmt. Somit war es möglich, für jeden Prüfkörper eine Holzfeuchte u_{Ende} zum Zeitpunkt des Ausbaus zu berechnen:

$$u_{\text{Ende}} = \frac{m_{u\text{ Ende}} - m_{0\text{ Ende}}}{m_{u\text{ Ende}}} * 100 \text{ [%]} \quad (17).$$

Einzeln für jeden Prüfkörper wurde der aus dem Angriff durch Basidiomyceten resultierende Masseverlust berechnet:

$$\Delta m (mB) = \frac{m_{0\text{ theoretisch}} (mB) - m_{0\text{ Ende}} (mB)}{m_{0\text{ theoretisch}} (mB)} * 100 \text{ [%]} \quad (18)$$

mit

$$m_{0\text{ theoretisch}} (mB) = \frac{m_u (mB)}{\frac{u(FK)}{100} + 1} \text{ [g]} \quad (19)$$

als theoretischem, aus dem Klimagewicht m_u (mB) und der mittleren Klimafeuchte $\overline{u(FK)}$ des jeweiligen Bereiches bestimmtem Darrgewicht eines Prüfkörpers $m_{0\text{ theoretisch}}(mB)$. Daraus ergibt sich der korrigierte mittlere Masseverlust zusammengehöriger Parallelen zu:

$$\overline{\Delta m_{\text{korrigiert}}(mB)} = \frac{1}{n} \sum \Delta m(mB) \pm \overline{\Delta m(oB)} \quad [\%] \quad (20)$$

wobei

$$\overline{\Delta m(oB)} = \frac{1}{n} \sum \frac{m_{0\text{ theoretisch}}(oB) - m_{0\text{ Ende}}(oB)}{m_{0\text{ theoretisch}}(oB)} * 100 \quad [\%] \quad (21)$$

die für jeden Bereich gemittelte Masseveränderung $\overline{\Delta m(oB)}$ aus den Parallelen ohne Angriff durch Basidiomyceten, aber unter durchlaufenen Prüfungsbedingungen berücksichtigen lässt. Die dafür zugrunde gelegten theoretischen Darrgewichte $m_{0\text{ theoretisch}}(oB)$ wurden analog zu den Parallelen mit Angriff durch Basidiomyceten ermittelt. Der von den jeweiligen Basidiomyceten verursachte korrigierte mittlere Masseverlust eines Bereiches wird zu dem entsprechenden mittleren Masseverlust an den Referenzprüfkörpern als relativer korrigierter Masseverlust, oder x -Wert zu

$$x = \frac{\overline{\Delta m_{\text{korrigiert}}(mB)}}{\overline{\Delta m(RP)}} \quad [-] \quad (22)$$

berechnet. Für *C. versicolor* wurde hierbei der an *P. sylvestris* hervorgerufene mittlere Masseverlust zugrunde gelegt, um den Vergleich zu einer Konifere herzustellen. Anhand des x -Wertes ist die Klassifikation der Dauerhaftigkeit des Douglasien-Kernholzes auf Basis der in DIN 350-1 (1994) enthaltenen Tabelle 10 möglich.

Tabelle 10 Klassen der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz gegen Befall durch Basidiomyceten aufgrund von Laborprüfungen auf der Basis von DIN 113 (1996/prA1 2003).

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	Ergebnis der Laborprüfungen, ausgedrückt als x -Wert
1	sehr dauerhaft	$x \leq 0,15$
2	dauerhaft	$x > 0,15$ aber $\leq 0,30$
3	mäßig dauerhaft	$x > 0,30$ aber $\leq 0,60$
4	wenig dauerhaft	$x > 0,60$ aber $\leq 0,90$
5	nicht dauerhaft	$x > 0,90$

Zur Gültigkeit des Prüfungsergebnisses ist nach DIN 113 (1996/prA1 2003) und DIN 350-1 (1994) zu berücksichtigen:

- Die Braunfäuleerreger müssen an Kiefern-Splintholz-Virulenzen einen Masseverlust von mindestens 20 % (m/m) verursachen, während der Weißfäuleerreger *Coriolus versicolor* einen Masseverlust von 20 % an Buchen-Virulenzen bzw. 15 % an Kiefern-Splintholz-Virulenzen hervorrufen muss.
- Prüfkörper, die Anzeichen von verunreinigenden Organismen aufwiesen, sind auszusondern.
- Die Einordnung des geprüften Holzes in eine Dauerhaftigkeitsklasse erfolgt anhand des Teilergebnisses, das den höchsten Masseverlust widerspiegelt. Ein geringerer Masseverlust unter anderen Bedingungen beeinflusst die Klassifikation nicht.
- Aus einer Laborprüfung gewonnene Ergebnisse müssen als richtungsweisende Tendenzen angesehen werden, im Freiland auftretende Phänomene können nicht simuliert werden.
- „Da Holz ein Naturprodukt ist, können seine Eigenschaften einschließlich der natürlichen Dauerhaftigkeit sehr variieren. Die in diesem Prüfbericht erfolgte Klassifizierung stellt nur einen Durchschnitt für das tatsächlich geprüfte Material dar und bezieht sich ausschließlich auf das Kernholz.“ (DIN 350-1 (1994), S. 6)

3.2.11 Verkürzte Prüfung zur natürlichen Dauerhaftigkeit

In dieser Prüfung wurde vordergründig das Holz der älteren Stammscheiben aus Kändern geprüft; zusätzlich eingesetztes Material stammte von bereits in den beiden Normprüfungen untersuchten Bäumen, während ein *Oregon pine*-Brett aus einer früheren Untersuchung (AUGUSTA 2007) einen orientierenden Vergleich mit amerikanischem Holz ermöglicht. Die zu prüfenden Bereiche des süddeutschen Douglasien-Kernholzes entsprachen der normangelehnten Prüfung eines inneren und äußeren Kernholzbereiches, wobei der äußerste Kernholzjahrring des älteren Holzes mindestens 59 Lebensjahre repräsentierte. Als Referenz wurde außerdem Kiefern-Splintholz (*P. sylvestris*) geprüft. Aus dem Holz wurden Blöcke der zu prüfenden Bereiche plus einer Maßzugabe geschnitten und diese anschließend zur Vorklimatisierung im Normklima (20 ± 2 °C, 65 ± 3 % r.L.) gelagert. Nachdem das Gewicht des Holzes konstant war, wurden fehlerfreie Prüfkörper der Maße $30 \times 30 \times 5$ mm³ (radial x tangential x longitudinal) für älteres und bereits untersuchtes Holz und – den Maßen des amerikanischen Brettes angepasst – $40 \times 25 \times 5$ mm³ geschnitten. Diese Maße bieten eine im Vergleich zu den Normprüfkörpern um 240 % größere Querschnittsfläche, was den Basidiomycetenangriff begünstigt. Allerdings galten diese Dimensionen auch für die Referenzprüfkörper aus Kiefern-Splintholz sowie die entsprechenden Prüfkörper zur Bestimmung der Klimafeuchte. Deshalb ist die Relation des Masseverlustes zu den Referenzprüfkörpern gewahrt. In der Prüfung wurden aufgrund

des begrenzt zur Verfügung stehenden Holzes keine Prüfkörper ohne Basidiomycetenangriff eingesetzt.

Tabelle 11 Prüfkörper für die verkürzte Prüfung der natürlichen Dauerhaftigkeit.

Standort	Baum	Bereich	Prüfkörper mit Basidiomycetenangriff (mB)		Prüfkörper zur Bestimmung der Klimafeuchte (FK)
			<i>C. puteana</i>	<i>P. placenta</i>	
<i>30 x 30 x 5 mm³</i>					
Lörrach	Baum 454	außen	6	6	4
Kandern	Baum 122	innen	6	6	4
Ehingen	Baum 121	außen	6	6	4
Löwenstein	Baum 41	innen	6	6	4
Kandern	Stammscheibe 1	innen / außen	6 / 6	6 / 6	4 / 4
Kandern	Stammscheibe 2	innen / außen	6 / 6	6 / 6	4 / 4
Kandern	Stammscheibe 3	innen / außen	6 / 6	6 / 6	4 / 4
Kandern	Stammscheibe 4	innen / außen	6 / 6	6 / 6	4 / 4
	Kiefern-Splintholz	Referenzprüfkörper	10	10	4
<i>40 x 25 x 5 mm³</i>					
Amerika	<i>Oregon pine</i> -Brett	-	6	6	4
	Kiefern-Splintholz	Referenzprüfkörper	6	6	4
Gesamt			94	94	60

Nach der Klimalagerung im Normalklima (20 ± 2 °C, 65 ± 3 % r.L.) bis zur Gewichtskonstanz folgte die Gewichts- und Volumenbestimmung. Anschließend wurden die dem Basidiomycetenangriff auszusetzenden Prüfkörper bei 31,4 kGy sterilisiert, während die Prüfkörper zur Bestimmung der Klimafeuchte bei 103 ± 2 °C gedarrt wurden. An diesen Prüfkörpern wurde die aus der Klimalagerung resultierende Holzfeuchte bestimmt (Formel 8), nachdem wieder Gewichte und Volumina gemessen wurden. Die aus dem Normalklima resultierende Rohdichte war ein aus diesen Größen bestimmter Parameter zur Charakterisierung des Materials (Formel 9). Das Nährmedium entsprach dem für die Normprüfungen angesetzten Gemisch aus Agar und Malz, das vor dem Befüllen in Petrischalen zu je 20 ml bei 121 °C autoklaviert wurde. In der Prüfung wurden lediglich die Basidiomyceten *Coniophora puteana* und *Poria placenta* eingesetzt, da diese in den Normprüfungen die höchsten Masseverluste hervorriefen. Vor Prüfungsbeginn musste aktives Mycel der Basidiomyceten heranwachsen. Unter sterilen Bedingungen wurden dazu Mycelflocken der Stammkulturen auf Nährmedium geimpft, wonach diese zwei (*P. placenta*) bzw. drei (*C. puteana*) Wochen bis zur vollständigen Besiedlung einer Petrischale (\varnothing 10 cm) wuchsen. Mit dem aktiven Mycel der Basidiomyceten wurden autoklavierte Petrischalen beimpft, worauf die Prüfkörper nach abermaligem Verstreichen der Wuchszeiträume auf V4a-Stahl Fächerscheiben (\varnothing 40 mm) eingebaut wurden. Für eine Dauer von acht Wochen im Herbst 2014 waren die Prüfkörper gemäß DIN 113 (1996/prA1 2003) in einem dunklen Raum bei definiertem Brutklima (22 ± 2 °C, 70 ± 5 % r.L.) dem Angriff der Basidiomyceten ausgesetzt. Nach Ablauf der Expositionsdauer wurden die Feuchtgewichte der Prüfkörper gewogen und eine Bonitierung des Bewuchses (Tabelle 9) vorgenommen. Anschließend wurde oberflächlich

anhaftendes Mycel entfernt und die Prüfkörper gedarrt. Darrgewichte der absolut trockenen Prüfkörper führten auf die Ausbaufeuchte (Formel 10) und den prozentualen Masseverlust:

$$\Delta m (mB) = \frac{m_{0 \text{ theoretisch}} (mB) - m_{0 \text{ Ende}} (mB)}{m_{0 \text{ theoretisch}} (mB)} * 100 \quad [\%] \quad (23).$$

Dabei ist $m_{0 \text{ theoretisch}} (mB)$ das theoretische Darrgewicht, das unter zugrunde legen der an den Prüfkörpern zur Bestimmung der Klimafeuchte bestimmten Klimafeuchte und den Klimagewichten der dem Angriff durch Basidiomyceten ausgesetzten Prüfkörper berechnet wurde (Formel 12). Im Unterschied zu den Prüfungen mit normgemäßer Expositionsdauer wurden die Referenzprüfkörper zur Bestimmung der Virulenz nicht gedarrt, um ein Darrgewicht vor dem Holzabbau zu bestimmen, sondern auch für diese Prüfkörper wurde analog zu den Douglasien-Prüfkörpern ein theoretisches Darrgewicht angenommen. So berechnet sich der mittlere Masseverlust eines Bereiches zu

$$\overline{\Delta m (mB)} = \frac{1}{n} \sum \Delta m (mB) \quad [\%] \quad (24),$$

woraus zur Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit in Anlehnung an DIN 350-1 (1994) ein Quotient

$$x = \frac{\overline{\Delta m (mB)}}{\Delta m (RP)} \quad [-] \quad (25)$$

gebildet wird. Anhand der x -Werte ist ein Vergleich der Ergebnisse der verkürzten Prüfung mit den Ergebnissen der Prüfung normgemäßer Expositionsdauer möglich.

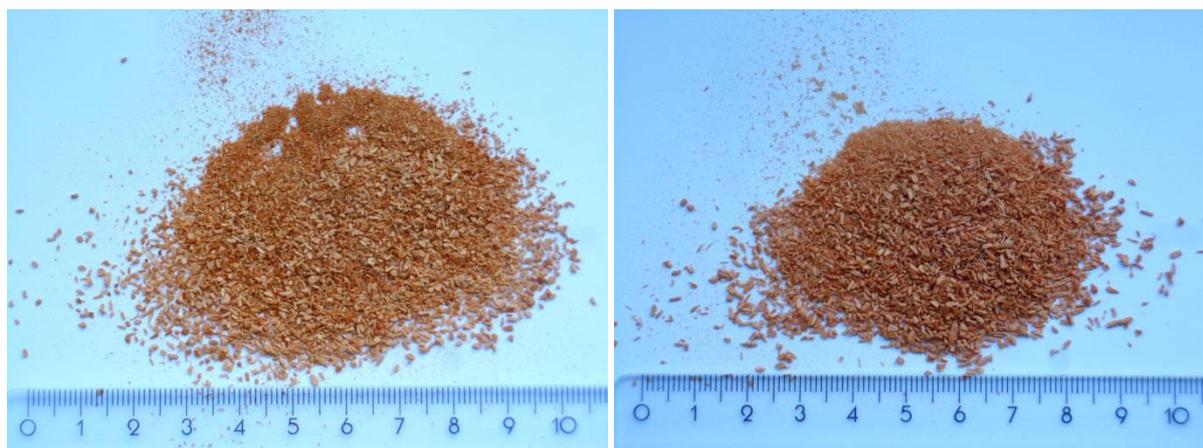
3.2.12 Bestimmung des Extraktstoffgehaltes

Aufgrund des generellen Zusammenhanges zwischen der Resistenz gegen Holzabbau und dem Extraktstoffgehalt wurden 20 Kontrollproben extrahiert, die tangential an Prüfkörper zur Dauerhaftigkeit angrenzten (SCHMIDT 2006, HAUPT et al. 2003). Außerdem wurden aus der ersten Prüfung der natürlichen Dauerhaftigkeit jeweils fünf Proben extrahiert, die durch *C. puteana* bzw. *P. placenta* abgebaut wurden. Wie in Tabelle 12 beschrieben, stammen die abgebauten Proben/Kontrollproben aus dem Standraumversuch, ergänzt um Proben von den älteren Bäumen aus Kändern.

Tabelle 12 Proben zur beschleunigten Flüssigextraktion, ausgewählt nach durch Basidiomyceten hervorgerufenen Masseverlusten [%]. Neben abgebauten Proben wurden intakte Parallelproben untersucht.

Standort	Baum	Bereich	Auswahlkriterium Masseverlust [%]	Basidiomycet	Kontrolle	abgebaute Probe
Lörrach	61	Innen	16	<i>P. placenta</i>	extrahiert	extrahiert
	454	Innen	22	<i>P. placenta</i>	extrahiert	extrahiert
	454	Außen	9	<i>C. puteana</i>	extrahiert	extrahiert
	576	Außen	4	<i>C. puteana</i>	extrahiert	extrahiert
	78	Innen	13	<i>C. puteana</i>	extrahiert	extrahiert
Kandern	19	Innen	3	<i>C. puteana</i>	extrahiert	extrahiert
	122	Innen	17	<i>P. placenta</i>	extrahiert	extrahiert
	22	Außen	14	<i>C. puteana</i>	extrahiert	extrahiert
	22	Außen	14	<i>P. placenta</i>	extrahiert	extrahiert
	222	Außen	20	<i>P. placenta</i>	extrahiert	extrahiert
Ehingen	121	Innen	14	<i>C. puteana</i>	extrahiert	-
	221	Außen	16	<i>P. placenta</i>	extrahiert	-
	94	Innen	7	<i>C. puteana</i>	extrahiert	-
	203	Außen	12	<i>C. puteana</i>	extrahiert	-
	120	Innen	18	<i>P. placenta</i>	extrahiert	-
Löwenstein	184	Außen	18	<i>P. placenta</i>	extrahiert	-
	66	Außen	5	<i>C. puteana</i>	extrahiert	-
	366	Innen	16	<i>C. puteana</i>	extrahiert	-
	400	Außen	16	<i>P. placenta</i>	extrahiert	-
	41	Innen	20	<i>P. placenta</i>	extrahiert	-
Kandern (ältere)	1	innen und außen			extrahiert	-
	2	innen und außen			extrahiert	-
	3	innen und außen			extrahiert	-
	4	innen und außen			extrahiert	-

Die Probenauswahl beinhaltet sowohl inneres, als auch äußeres Kernholz – wesentliches Kriterium war allerdings der in den Prüfungen der natürlichen Dauerhaftigkeit hervorgerufene Masseverlust, wobei hohe, mittlere und niedrige Masseverluste berücksichtigt wurden. Das Holz wurde zuerst manuell auf Streichholzgröße vorgespalten und anschließend in einer Labormühle (MF 10 basic mit Schneidemahlkopf MF 10.1, IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Staufen) bei eingesetztem Lochblech mit Bohrungsdurchmesser 2 mm gemahlen. Ein visueller Vergleich der Holzmehle intakter und abgebauter Proben zeigte ähnliche Größen und Anteile an größeren Partikeln, wie in Abbildung 8 zu erkennen, zusätzlich fand sich jedoch im abgebauten Material ein größerer Anteil feiner Partikel.

Abbildung 8 Vergleich der Holzmehle. Abgebaute Probe (links), Kontrollprobe (rechts).

Da bereits mit marginalen Masseverlusten ein deutlicher Festigkeitsverlust einhergeht (CURLING et al. 2002), wurde die Verteilung der Partikelgrößen als materialcharakteristisch angesehen und das Material zur Wahrung einer einheitlichen Methode bzw. unter Ausschluss selektiver Behandlung ohne Fraktionierung extrahiert. Doppelbestimmt wurden etwa 1,5 g luftgetrockneten Materials in mit Cellulosefiltern verschlossene Extraktionszellen eingewogen (AG 245, Genauigkeit $\pm 0,002$ g, Mettler-Toledo GmbH, Gießen). Zum gleichen Zeitpunkt gedarrtes Material ermöglichte eine Bestimmung des gravimetrischen Feuchtegehaltes aus der darrtrockenen Masse des Holzmehls m_{darr} und der luftgetrockneten Masse des Holzmehls $m_{luftgetrocknet}$:

$$\text{Feuchtegehalt} = \frac{1}{n} \sum \frac{m_{darr}}{m_{luftgetrocknet}} * 100 \text{ [\%]} \quad (26).$$

Die Bestimmung des Feuchtegehaltes ermöglicht es, den Extraktstoffgehalt auf das Trockengewicht der Einwaage zu beziehen. Für die Berechnung des Trockengewichtes der abgebauten Proben wird der Masseverlust berücksichtigt, um den Extraktstoffgehalt auf das Ausgangsgewicht vor dem Holzabbau zu beziehen. Damit die Extraktionszellen nicht verstopften, war es aufgrund der Feinheit der abgebauten Proben erforderlich, hochreine Diatomeenerde als inertes Medium beizumengen. In einem Extraktionsautomaten (ASE 200, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA) wurden die Zellen nach dem in Tabelle 13 gezeigten Programm mit den höchstreinen Lösemitteln Petrolether, Aceton/Wasser (9/1), Ethanol/Wasser (8/2) und Wasser sukzessiv extrahiert, wobei erhöhte Temperaturen und Druck die Reaktionen beschleunigten. Nach Ablauf des Programms wurden alle Extrakte mit den entsprechenden Lösemitteln auf 25 ml aufgefüllt und hieraus 10 ml Aliquote getrocknet. Die Masse dieser getrockneten Extrakte $m_{10 \text{ ml trocken}}$ führte in Relation zu den darrtrockenen Einwaagen des Holzmehls $m_{\text{Einwaage darr}}$ auf den gravimetrischen Extraktstoffgehalt einer Lösemittelfraktion:

$$\text{Extraktstoffgehalt} = \frac{m_{10 \text{ ml trocken}} * 2,5}{m_{\text{Einwaage darr}}} * 100 \text{ [\%]} \quad (27).$$

Die zwei aus der unabhängig voneinander ausgeführten Doppelbestimmung resultierenden Extraktstoffgehalte der Lösemittelfractionen stimmen im Mittel zu 89 % überein und werden zu den jeweiligen Extrakten gemittelt. Aus der Summe der einzelnen Extrakte werden die Gesamt-Extraktstoffgehalte durch Addition bestimmt.

Tabelle 13 Programm der beschleunigten Flüssigextraktion. Geradzahlige Schritte sind Reinigungsschritte.

Schritt	Lösemittel	Vorheizen [min]	Heizen [min]	Statische Phase [min]	Spülen [% vol.]	Reinigen [s]	Zyklen	Druck [bar]	Temperatur [°C]
1	Petrolether	5	5	10	80	90	2	100	70
2	Aceton (9) - Wasser (1)	1	5	1	60	70	1	100	70
3	Aceton (9) - Wasser (1)	5	5	10	80	90	2	100	70
4	Ethanol (8) - Wasser (2)	1	5	1	60	70	1	100	70
5	Ethanol (8) - Wasser (2)	5	5	10	80	90	2	100	70
6	Wasser	1	5	1	60	70	1	100	90
7	Wasser	5	5	10	80	90	2	100	90

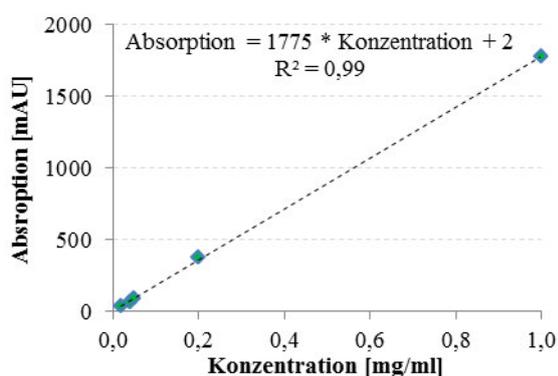
3.2.13 Bestimmung des Taxifolingehaltes

Der prozentuale Anteil des Flavanonols Taxifolin aus Aceton/Wasserextrakten der abgebauten Proben und Kontrollproben wurde bestimmt durch Reverse-Phase Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (RP-HPLC, JASCO MD-2010 Plus mit JASCO PU-2080-Plus, JASCO LG-208004, JASCO DG-208054 und JASCO AS-2057 Plus, mit Software Chrompass). Zur Kalibration diente eine Konzentrationsreihe von 0,02 – 0,04 – 0,05 – 0,2 – 1 mg/ml reinen Taxifolins, das in Aceton gelöst war (LAI et al. 1992). Jeweils 5 µl dieser Konzentrationen wurden in die Anlage eingespritzt. Die injizierten Volumina wurden entgast und bei 30 °C eluiert auf eine unpolare C18-Säule (Thermo Aquasil C18, 4,6 mm x 250 mm, 5 µm, Porengröße 100 Å). Hochreine Eluenten waren dabei 0,001 M Phosphorsäure und Acetonitril, die mit einer konstanten Flussgeschwindigkeit von 1 ml/min entlang des in Tabelle 14 dargestellten Konzentrationsgradienten bei Drücken von 60 bis 140 bar variiert wurden. Zu einer säulen- und polaritätsabhängigen Retentionszeit von etwa 36,8 min wurde das in der Lösung alleinig vorhandene Taxifolin bei einer UV-Wellenlänge von 210 nm detektiert und die Absorption in Absorptionseinheiten ausgegeben. Anhand der Absorptionswerte der einzelnen

Konzentrationen wurde die in Abbildung 9 gezeigte Regressionsgerade zur Quantifizierung von Taxifolin als Komponente in den Douglasien-Kernholzextrakten berechnet. Die Absorption retentionszeitlich getrennter Komponenten in die Anlage eingespritzter Aliquote von Aceton- und Ethanol/Wasserextrakten wurde in Chromatogrammen dokumentiert und die Taxifolinmenge durch Flächenintegration des charakteristischen Ausschlags quantifiziert.

Abbildung 9

Lineare Regression zur Bestimmung des Taxifolingehaltes [mg/ml] von Douglasien-Kernholz Extrakten anhand der Absorption [mAU] bei 210 nm.

**Tabelle 14**

Konzentrationsgradient und Fluss [ml/min] der Eluenten Phosphorsäure (0,001 M) [%] und Acetonitril [%]

Zeit [min]	Phosphorsäure (0,001 M) [%]	Acetonitril [%]	Fluss [ml/min]
0	97,5	2,5	1
20	85	15	1
50	68	32	1
56	62	38	1
60	59	41	1
63	58	42	1
70	41	59	1
80	100	0	1

3.2.14 *In-situ* Studien von Basidiomycetenaktivität

Anhand früherer Studien von Befall mit verschiedenen Basidiomyceten sollten Beispiele der Basidiomycetenaktivität im Douglasien-Kernholz dargestellt werden. Mit einer Bügelklinge (Ever-Sharp-Blades Art.-Nr. 10-102-055, Apollo Herkenrath GmbH & Co. KG, Solingen) wurden feine Stiftchen der Dimensionen 1-1,5 mm² Querschnittsfläche x 10 mm Länge präpariert. Alle Proben beinhalteten eine Jahrringgrenze mit den letzten Spätholztracheiden und den ersten Frühholztracheiden des Folgejahres. Die Schnitte mussten sehr sauber und exakt geführt werden, um eine Beeinträchtigung der Proben auszuschließen und das Eindringen des Einbettmediums in die Proben zu begünstigen. Nach Abschluss der Präparation wurde das Material bei 121 °C für 20 Minuten autoklaviert. In einer sterilen Impfbank wurden die Proben auf vorher durch Abimpfung aktiviertem Mycel der Basidiomyceten *P. placenta* und *C. puteana* platziert. Um ein Austrocknen der Proben über die verhältnismäßig große Oberfläche zu verhindern, wurden die Holzstückchen nicht wie zu Prüfung der natürlichen Dauerhaftigkeit auf Fächerscheiben, sondern wie in Abbildung 10 gezeigt mit einem Zentimeter Abstand von der Impfflocke direkt auf dem Nährmedium platziert. Da die Versuchsbedingungen für alle Hölzer und Basidiomyceten gleich waren, wurden Parallelproben in verschiedene Petrischalen (Ø 10 cm) gesetzt, um im Falle eines Fremdinfektes eine Reserve zu behalten. Nach Ergebnissen früherer Untersuchungen wurde eine Expositionsdauer von 21 Tagen veranschlagt, da nach dieser Zeit einerseits mit Holzabbau, andererseits mit dem Eindringen der Hyphen in das Holz zu rechnen war (REHBEIN & KOCH 2011). Während des Wachstums wurden die

Petrischalen wöchentlich auf Fremdinfekte überprüft und je Basidiomycet eine Petrischale zur späteren Einbettung ausgewählt, so dass von jedem Basidiomyceten mindestens zwei Proben zur Verfügung standen. Nach Ablauf der Versuchsdauer wurden die Holzstifte mit einer Rasierklinge aus dem oberflächlich anhaftenden Mycel geschnitten und in zwei Proben á 1-1,5 mm² Querschnittsfläche x 5 mm Länge aufgeteilt.

Abbildung 10 Douglasien-Kernholzproben mit Befall von *C. puteana* (links) und *P. placenta* (rechts) zur Betrachtung im Transmissionselektronenmikroskop. Durchmesser der Petrischalen: 10 cm.



Direkt im Anschluss an die Entnahme wurden die ausgewählten Proben für drei Tage in Karnovsky-Fixierlösung (50 Vol. % Paraformaldehyd, 30 Vol. % Glutaraldehyd, 20 Vol. % Cacodylatpuffer) gelagert, um die Hyphen der Basidiomyceten wie im lebenden Zustand zu fixieren. Nachdem die Proben mit 0,1 M Cacodylatpuffer gewaschen wurden, folgte für die eine Hälfte der Probenstiftchen eine eintägige Nachfixierung und Vorkontrastierung in 2 % Osmiumtetroxid in Cacodylatpuffer, während die andere Hälfte später mit anderen Agentien nachkontrastiert werden sollte. Am Folgetag wurden die Proben abermals mit 0,1 M Cacodylatpuffer gewaschen, in einer aufsteigenden Aceton-Reihe entwässert und gekühlt gelagert. Hierauf erfolgte die Einbettung in Epoxidharz nach SPURR (1969), bestehend aus

- 65 Gew.-% Nonenylbersteinsäureanhydrid (Härter),
- 25 Gew.-% 3,4-Epoxycyclohexylmethyl-3,4-epoxycyclohexylcarboxylate (Grundstoff),
- 10 Gew.-% Diepoxid (Weichmacher), sowie
- ~1 Gew.-% Dimethylaminoethanol (Beschleuniger).

Die Einwirkzeit betrug einen Tag, wobei die Proben über mehrere Wechsel des Mediums mit ansteigendem Verhältnis von Epoxidharz zu Aceton infiltriert wurden. Nach der Positionierung der Probenstiftchen in Mulden der mit Epoxidharz gefüllten Gussform wurden die Proben zur Polymerisation für drei Tage bei 70 °C in einem Wärmeschrank gelagert. Die resultierenden

Epoxidharzklötzchen aus Formgußverfahren mit einliegendem Probenstiftchen waren luftfrei bzw. vollständig vom Einbettmedium infiltriert.

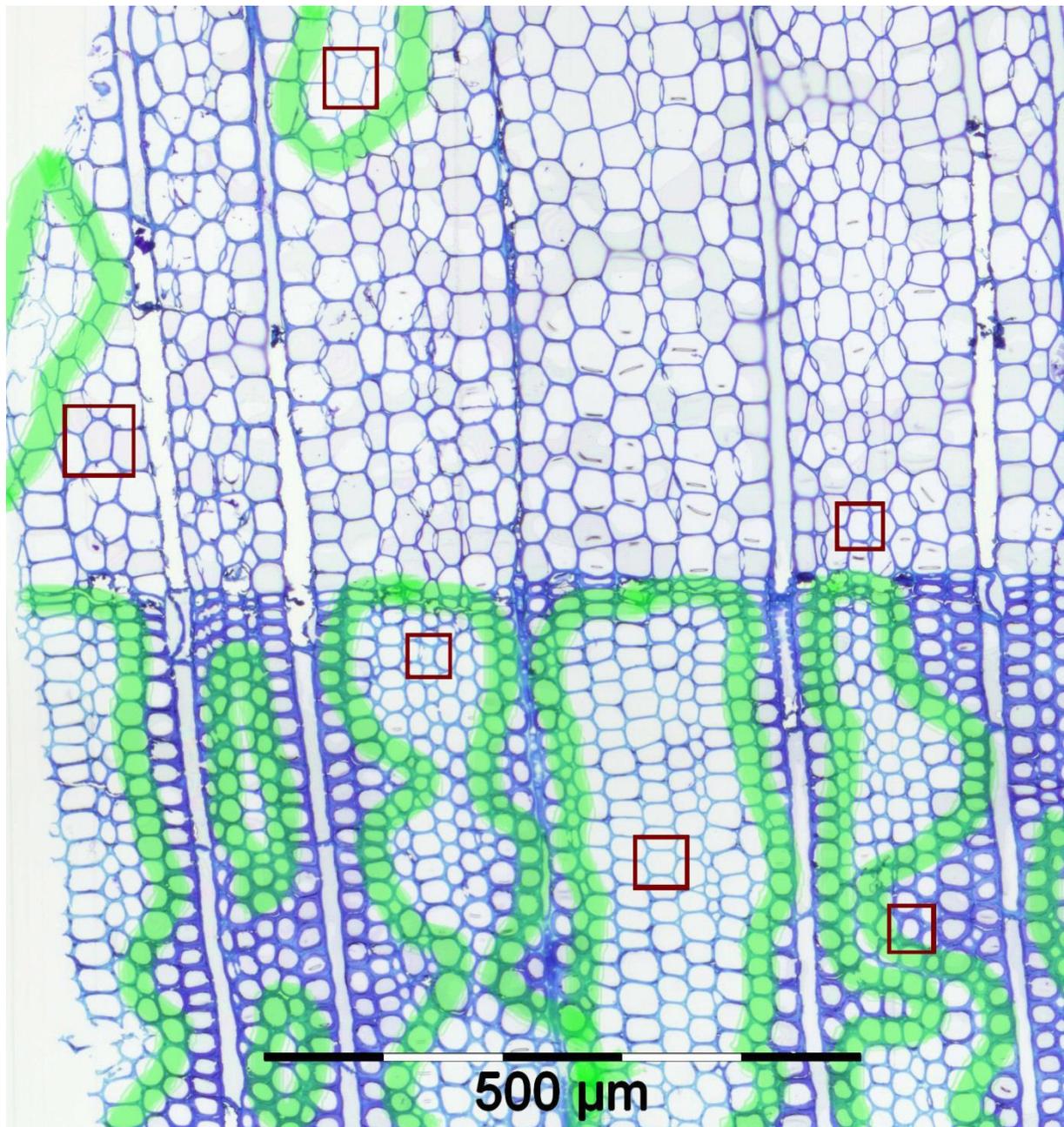
Vor dem Schneiden mit dem Ultramikrotom (Ultracut E, C. Reichert Optische Werke AG, Wien, Austria) galt es, die Klötzchen vorzutrimmen, so dass eine trapezförmig hervorstehende Querschnittfläche entstand. Um die Schnittanzahl des Diamantmessers (ultra 45°, Diatome AG, Biel, Switzerland) zu minimieren, bot es sich an, zum Glätten der späteren Schnittfläche ein Glasmesser (G335, Plano GmbH, Wetzlar) zu verwenden. Zur lichtmikroskopischen Orientierung wurden erste Schnitte mit dem Diamantmesser in einer Stärke von 1 µm geführt, diese anschließend bei 80 °C auf einer Heizplatte (2208 Multiplate, LKB Produkter AB, Bromma, Sweden) gestreckt, fixiert und mit Toluidinblau gefärbt. Da mit zunehmender Fläche die Schnittqualität sinkt, mussten durch lichtmikroskopische Untersuchungen geeignete Bereiche für die Transmissionselektronenmikroskopie ausgewählt werden. Nach entsprechendem Trimmen wurden diese mit einer Stärke von 0,1 µm geschnitten und im Anschluss auf kleine Kupfernetze gezogen. Darauf folgte entweder für die bereits mit Osmiumtetroxid vorkontrastierten Proben eine selektive Nachkontrastierung zum Hervorheben der Zellwände und Zellorganellen mit Uranylacetat und Bleicitrat oder für die nicht vorkontrastierten Proben eine ligninspezifische Kontrastierung mit Kaliumpermanganat (SCHMITT & MELCHER 2004). Anschließend wurden die Proben im Transmissionselektronenmikroskop (CM12, Koninklijke Philips N.V., Amsterdam, Niederlande) untersucht und bei etwa 80 kV mit 3800 bis 10.000-facher Vergrößerung aufgenommen. Die Negative wurden entwickelt, zwischengewässert, fixiert, im Ageponbad gefinished und danach hochaufgelöst gescannt. Einige der verwendeten Chemikalien sind hoch toxisch oder radioaktiv, weshalb entsprechende Vorsichtsmaßnahmen eingehalten werden mussten.

3.2.15 Zelluläre UV-Vis-Mikrospektrophotometrie

Zur Untersuchung der Ligninverteilung in der Zellwand abgebauter Proben und angrenzender Kontrollproben wurde die zelluläre UV-Vis-Mikrospektroskopie angewandt (UMSP 80, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena mit Software APAMOS). Der Probenumfang umfasste zehn repräsentative abgebaute Proben aus der ersten Prüfung der natürlichen Dauerhaftigkeit und zehn Kontrollproben, die radial an die abgebauten Proben grenzten (Tabelle 12, Standorte Lörrach und Kandern). Die Proben wurden zu feinen Stiftchen von etwa 1-1,5 mm² Querschnittsfläche und 5 mm Länge präpariert, wobei eine Jahrringgrenze im Querschnitt enthalten war. Danach wurden die Proben in einer Vakuumeinbettung stabilisiert, wozu das gleiche Epoxidharz wie für die *in-situ* Einbettung verwendet wurde. Die Infiltration der Proben erfolgte mittels Vakuum: in drei Zyklen wurde Vakuum angelegt, belüftet und das Harz gewechselt. Danach standen die Proben einen weiteren Tag zur Infiltration ohne Vakuum, worauf die Polymerisation bei 70 °C im Wärmeschrank folgte. Anschließend wurden die Proben wie für die Transmissionselektronenmikroskopie beschrieben am Ultramikrotom in einer

Schnittstärke von 1 μm geschnitten und auf Quarzobjektträgern in UV-inaktivem Glycerin mit einem Quarzdeckgläschen eingebettet.

Abbildung 11 Ausschnitt aus dem lichtmikroskopischen Schnitt des durch *P. placenta* abgebauten inneren Kernholzes von Baum 122 aus Kändern mit markierten Feldern (rote Boxen) zur UV-Vis-Mikrospektroskopie und anhand der Färbung mit Toluidinblau lichtmikroskopisch identifizierte Zonen des Holzabbaus (grün).



Außerdem wurde ein Schnitt zur Lichtmikroskopie angefertigt, der nach Streckung, Färbung mit Toluidinblau und Aufnahme eines Übersichtsbildes zur Auswahl von Messfeldern wie in Abbildung 11 diente. Pro Schnitt wurden mindestens drei Scanning-Felder im Frühholz, sowie mindestens drei

Felder im Spätholz definiert. Dabei wurden die Felder in verschiedenen Entfernungen von der Jahrringgrenze und möglichst tangential zwischen verschiedenen Holzstrahlen liegend markiert. Jedes Feld beinhaltete mindestens eine vollständig quergeschnittene Tracheide und in keinem Fall Holzstrahlparenchym. Beim für Nadelholzlignin spezifischen Absorptionsmaximum von 280 nm wurden die Felder gescannt und unter Nutzung des Lambert-Beer'schen Gesetzes die UV-Absorptionsintensität gemessen. Die Werte wurden bei einer Auflösung von $0,25 \mu\text{m} \times 0,25 \mu\text{m}$ pro Pixel in 4096 Graustufen ausgegeben, die in 14 Farben konvertiert eine optische Auswertung begünstigten.

3.2.16 Identifizierung juvenilen und adulten Holzes

Methoden zur Identifizierung juvenilen und adulten Holzes reichen von visueller Schätzung bis zur Anwendung komplexer Berechnungsmodelle auf geeignete Holzmerkmale. Ausgewählt wurde ein Ansatz, der mittels segmentierter linearer Regression oder ‚broken stick regression‘ lebensjährliche Mittelwerte der ermittelten Eigenschaften zu einer Funktion vereinfacht (ABDEL-GADIR & KRAHMER 1993a). In teilweise abgewandelter Form nutzte diese Methode Untersuchungen an verschiedenen Holzarten (BAWCOMBE 2012, ALTEYRAC et al. 2006, FABRIS 2000, SAUTER et al. 1999). Die Identifizierung basiert auf den lebensjährlichen Mittelwerten der Merkmale Mikrofibrillenwinkel, Rohdichte, Tracheidenwanddicke und Spätholzanteil (BENDTSEN 1978). Um den subjektiven Charakter einer zur Berechnung benötigten Schätzung zu eliminieren, wird für jedes Lebensjahr unterstellt, es könne das Ende der juvenilen Phase markieren. Ausgehend von der rechnerischen Unterteilung der gemessenen Mittelwerte y_i in ‚der juvenilen Phase zugehörig‘ und ‚der adulten Phase zugehörig‘ berechnet

$$y_{i\text{reg}} = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 (x_i - x_{i*}) D \quad (28)$$

regressive mittlere lebensjährliche Werte $y_{i\text{reg}}$ der Merkmale als abhängige Variable mit dem kambialen Alter als unabhängige Variable x_i und den unterstellten letzten juvenilen Lebensjahren x_{i*} . Die Koeffizienten beschreiben das juvenile und adulte Segment der Funktion:

- β_0 y-Abschnitt des juvenilen Segments,
- β_1 Steigung des juvenilen Segments,
- β_2 Steigung des adulten Segments,
- D Faktor zur Unterscheidung der Segmente:
 bei $x_i \leq x_{i*}$ ist $D = 0$ (juveniles Segment)
 bei $x_i > x_{i*}$ ist $D = 1$ (adultes Segment).

Aufgrund eines charakteristischen globalen Minimums der Merkmale Rohdichte und Tracheidenwanddicke im etwa fünften Jahrring (JOZSA & MIDDLETON 1994, DI LUCCA 1989), sowie teilweise auch des Spätholzanteils, gilt die generelle Bedingung, dass die Berechnung erst beim globalen Minimum beginnt. Lediglich im Fall eines untypisch späten globalen Minimums wird die Funktion angepasst und das marknahe lokale Minimum als Beginn der Berechnung definiert. Der Mikrofibrillenwinkel nimmt vom Mark zum Kambium ab; deshalb wird keine Bedingung zum Beginn der Berechnung definiert. Neben der Verknüpfung der beiden linearen Segmente in ihrem Schnittpunkt wird die Funktion

$$y_{i \text{ reg}} = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 (x_i - x_{i^*}) D + \beta_3 D \quad (29)$$

angewendet, um einen Sprung vom Ende des juvenilen Segments zum Beginn des adulten Segments darzustellen. Dabei ist der zusätzliche Koeffizient definiert als

β_3 Differenz der y-Abschnitte des adulten und juvenilen Segments.

Durch die Methode der kleinsten Quadrate wird die beste Lösung zur Bestimmung des Lebensjahres des Eintritts in die adulte Phase identifiziert und das Bestimmtheitsmaß der Korrelation gemessener Werte mit den durch die jeweils gewählte beschreibende Funktion berechneten Werten dokumentiert. Das für jedes Merkmal berechnete Eintrittsalter in die adulte Phase dient zur Charakterisierung der Eigenschaften juvenilen und adulten Holzes – sowohl für die zur Identifizierung zulässigen Merkmale, als auch – angewandt nach generellen Korrelationen auf Merkmale, die keine Identifizierung zulassen. Die erste Anwendung der segmentierten linearen Regression auf den Spätholzanteil wird exemplarisch dargestellt.

3.3 Statistik

Viele Messreihen und die daraus erzeugten verschiedenen Kollektive zeichnen sich durch nicht normalverteilte, ordinale oder metrische und miteinander verbundene Daten aus (LORENZ 1988). Zur Prüfung auf Signifikanz von Unterschieden zwischen Kollektiven, die Eigenschaften des untersuchten Materials abbilden, ist ein Test erforderlich, der parameterfreie Vergleiche zulässt. Aus diesem Grund fällt die Wahl des anzuwendenden Signifikanztests auf den H -Test nach KRUSKAL & WALLIS (1952). Am Beispiel des Vergleiches der Früh- bzw. Spätholztracheiden langsam und schnell gewachsener Bäume (Tabelle 15) wird der H -Test beschrieben. Sei die

Nullhypothese H_0 : „Die Länge der Frühholztracheiden schnell gewachsener Bäume *unterscheidet sich nicht* von der Länge der Frühholztracheiden langsam gewachsener Bäume“,

und die

Alternativhypothese H_1 : „Die Länge der Frühholztracheiden schnell gewachsener Bäume *unterscheidet sich* von der Länge der Frühholztracheiden langsam gewachsener Bäume“.

Da die jedem der zwei Kollektive zugrunde liegenden Werte für das Frühholz gelten, besteht eine Verbindung der zu vergleichenden Kollektive. Der zu untersuchende Unterschied liegt in der Wuchsgeschwindigkeit der Kollektive: langsam vs. schnell gewachsen. Als Forderung des Tests werden die metrischen Daten auf ordinale Daten in Form von Rängen reduziert; statt eines Unterschiedes von beispielsweise 1824 zu 1189 μm wird der Unterschied von Rang 252 zu Rang 20 betrachtet. Im Falle des Auftretens eines gleichen Wertes der Tracheidenlänge im Kollektiv ‚Frühholz langsam gewachsen‘ und im Kollektiv ‚Frühholz schnell gewachsen‘ werden diese Bindungen durch die Berechnung gebundener Ränge für solche Messwerte $r_{A_t}(x_i)$ berücksichtigt:

$$r_{A_t}(x_i) = \frac{r_A(x_i) + N - r_Z(x_i) + 1}{2} \quad [-] \quad (30).$$

$$r_{A_t}(1345 \mu\text{m}) = \frac{46 + 843 - 797 + 1}{2} = 46,5$$

Dabei ist $r_A(x_i)$ der aufsteigende Rang eines Messwertes, angefangen mit Rang 1 für den kleinsten Messwert, $r_Z(x_i)$ der absteigende Rang desselben Messwertes, angefangen mit dem höchsten vergebenen Rang und N die Anzahl aller Messwerte der miteinander verglichenen Kollektive. Verallgemeinert wird eine Anzahl gleicher Werte auf den Mittelwert des ersten zu vergebenen Ranges und der nachfolgend zu vergebenen Ränge gesetzt – je nach Anzahl der gleichen Messwerte.

Die derart in die Mittelung eingehenden Ränge werden anschließend nicht vergeben. Durch die Berücksichtigung von Bindungen bereits bei der Rangvergabe kann die einfache Formel zur Berechnung des H -Wertes genutzt werden:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (31).$$

Dabei ist C die Anzahl der zu vergleichenden Kollektive, n_i die Anzahl der Messwerte des i ten Kollektives, $N = \sum n_i$ die Anzahl aller Messwerte der Kollektive und R_i die Summe der Ränge des i ten Kollektivs. Für den Vergleich des Frühholzes schnell und langsam gewachsener Bäume ergibt sich der H -Wert zu:

$$H = \frac{12}{843(843+1)} \left(\frac{183891^2}{418} + \frac{171855^2}{425} \right) - 3(843+1) = 4,49590226802502.$$

Zur Berücksichtigung von Bindungen wird ein Korrekturdivisor D berechnet:

$$D = 1 - \frac{\sum(t^3-t)}{N^3-N} \quad (32).$$

Hier ist t die jeweilige Anzahl der gleichen Ränge der einzelnen Bindungen der Kollektive. Bei einer geringen Anzahl von Bindungen ging D gegen 1, beim Fehlen von Bindungen ist $D = 1$. Im Fall des Beispiels mit 4 Bindungen, die jeweils zweimal denselben Rang haben, beträgt der Wert von D :

$$D = 1 - \frac{6+6+6+6}{843^3-843} = 0,999999959938323.$$

Durch Bildung des Quotienten H/D resultiert der Wert für $H_{korrigiert}$:

$$H_{korrigiert} = \frac{\frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)}{1 - \frac{\sum(t^3-t)}{N^3-N}} \quad (33).$$

Im gewählten Beispiel ergibt sich

$$H_{korrigiert} = \frac{4,49590226802502}{0,999999959938323} = 4,49590244813841.$$

Der H -Wert beschreibt die Varianz der Rangquadrate der Kollektive und ist annähernd χ^2 -verteilt. Das heißt, mit Freiheitsgrad 1 markieren H -Werte größer als etwa 3,85 die Signifikanzniveaus kleiner als 0,05. Die Wahrscheinlichkeit der wahren Nullhypothese berechnet sich nach KRUSKAL &

WALLIS (1952) als χ^2 größer oder gleich des H -Wertes mit einem Freiheitsgrad. Für das Beispiel ergibt sich

$$P[\chi^2(1) \geq 4,49590244813841] = 0,034.$$

Werden die Irrtumswahrscheinlichkeiten dem Vorschlag von MILLER (1966) folgend festgelegt zu:

kein signifikanter Unterschied:	$0,05 \geq \alpha$	–	(not significant),
signifikanter Unterschied:	$0,05 > \alpha \geq 0,01$	+	(significant),
dezisiver Unterschied:	$0,01 > \alpha \geq 0,001$	++	(decisive) und
konklusiver Unterschied:	$0,001 > \alpha$	+++	(conclusive),

so ist im gewählten Beispiel mit 95 bis 99 % Wahrscheinlichkeit die Zurückweisung der Nullhypothese richtig, bzw. es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen der Länge von langsam und schnell gewachsenen Frühholztracheiden. Wird die Länge der Tracheiden und deren Mittelwerte wie in Abbildung 12 gegen die Ränge der Messwerte aufgetragen, so ist erkennbar, dass die höchsten Ränge vornehmlich von Tracheiden langsam gewachsen Holzes eingenommen werden. Auch ist dem Mittelwert der Tracheidenlänge des Früh- bzw. Spätholzes langsam gewachsenen Holzes ein höherer Rang zugeordnet. Noch deutlicher wird der Unterschied, wenn die Werte wie durch Abbildung 13 als Histogramm dargestellt werden. JARQUE & BERA (1980) schlagen vor, Verteilungen anhand deren Schiefe und Wölbung auf normal verteilte Werte zu prüfen. Die Schiefe v einer Verteilung berechnet sich zu

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad [-] \quad (34)$$

wobei x_i die einzelnen Messwerte, \bar{x} der Mittelwert und s die Standardabweichung der Verteilung sind. Für positive Werte von v gilt die Verteilung als rechtsschief, während negative Werte von v Linksschiefe bedeuten. Symmetrische Verteilungen, wie z.B. eine Normalverteilung, haben eine Schiefe von null, d.h. der Betrag der Schiefe quantifiziert die Abweichung von normalen Verteilungen. Die Beispielsverteilungen sind damit alle rechtsschief. Zur Berechnung der Wölbung w von Verteilungen gilt die Beziehung

$$w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \quad [-] \quad (35).$$

Die Wölbung ist somit immer positiv – kleine Beträge charakterisieren eine stärker um den Mittelwert streuende Verteilung, während große Beträge eine Konzentration der Werte um den Mittelwert anzeigen. Der Betrag der Wölbung normalverteilter Werte ist 3, daher kommt die Wölbung der

Verteilung der schnell gewachsenen Frühholztracheiden der Wölbung normalverteilter Werte am nächsten. Um die Werte nach dem Test von JARQUE & BERA (1980) zu auf Normalverteilung zu prüfen, folgt

$$Testwert = \frac{n}{6} \left(v^2 + \frac{(k-3)^2}{4} \right) [-] \tag{36}.$$

Mit Wahrscheinlichkeiten von α zu 10 oder 5 bzw. 2 % unter Annahme von χ^2 -verteilten Testwerten mit 2 Freiheitsgraden muss die Nullhypothese, eine Verteilung sei normalverteilt, ab Schwellenwerten von 4,6 bzw. 6 oder 7 verworfen werden, weshalb keine der Beispielverteilungen normalverteilt ist.

Abbildung 12 Verteilung, Mittelwerte und Standardabweichung sowie Ränge nach KRUSKAL & WALLIS (1952) der Länge [μm] langsam und schnell gewachsener Früh- und Spätholztracheiden aus den Beispielen (1) und (2) (Tabelle 15).

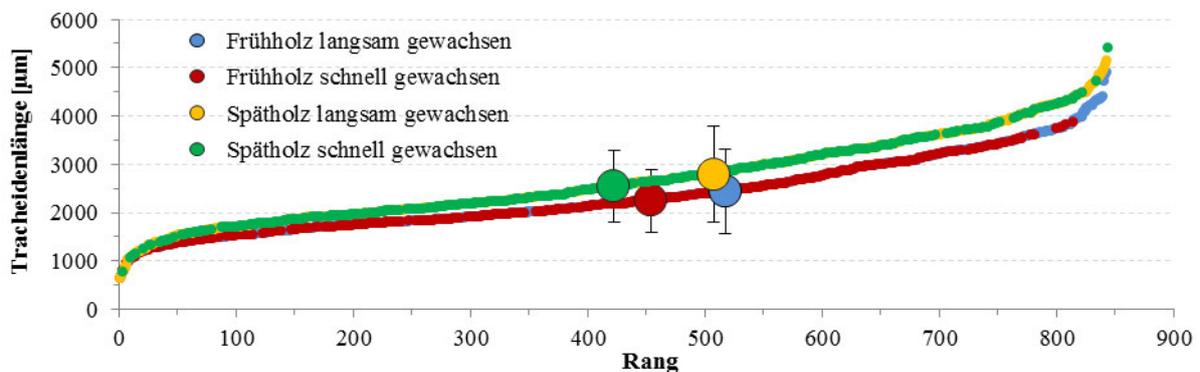
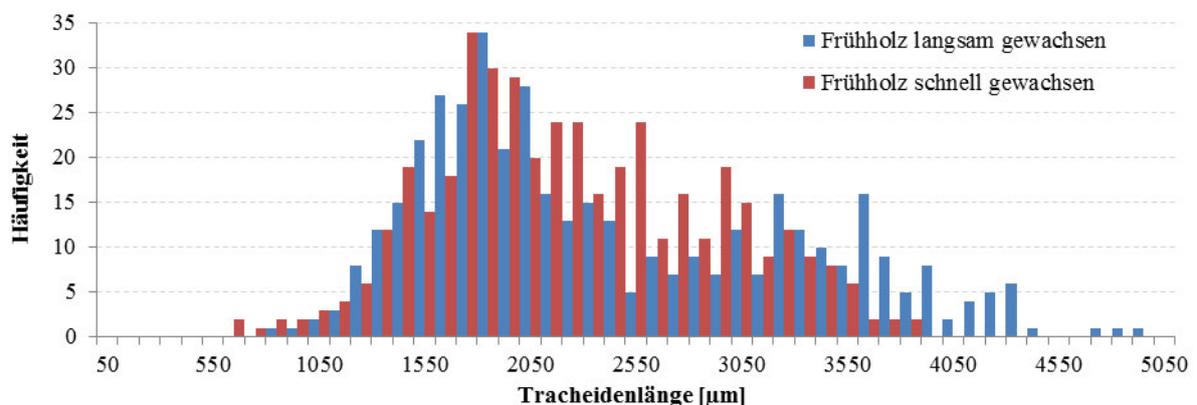


Abbildung 13 Häufigkeit der Tracheidenlänge [μm] langsam gewachsenen Frühholzes (blau, $n = 418$) und schnell gewachsenen Frühholzes (rot, $n = 425$) in Klassen zu 100 μm .

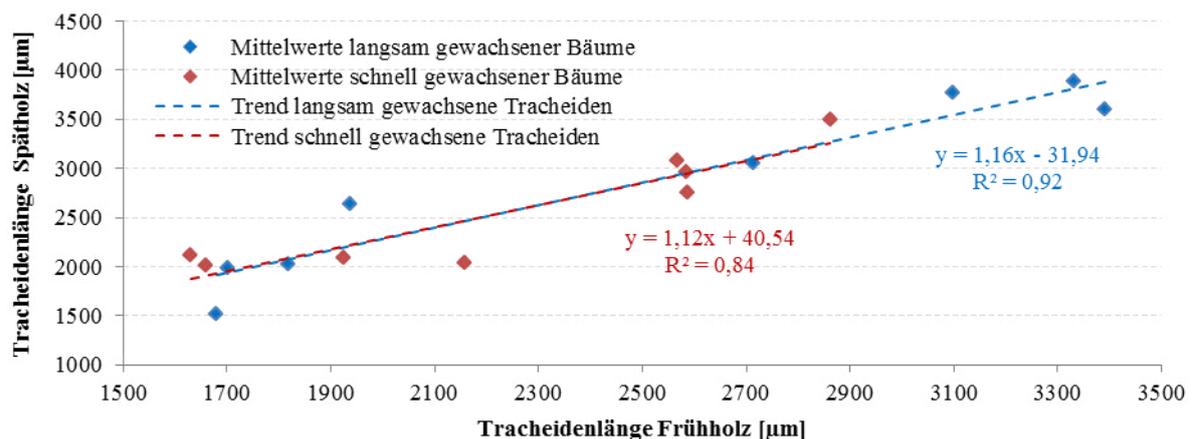


Werden zwei Eigenschaften miteinander korreliert, beschreibt das Bestimmtheitsmaß R^2 , zu welchem Ausmaß eine Eigenschaft x_i durch die andere Eigenschaft y_i erklärt wird. Dazu wird in Relation zu den Mittelwerten \bar{x} und \bar{y} mittels der Methode der kleinsten Quadrate berechnet, wie groß der Anteil der Variation einzelner Wertepaare innerhalb des zugrunde liegenden Zusammenhanges ist:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2 \quad (37).$$

Für das Beispiel beträgt das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,92$ bzw. 92 % für die in Abbildung 14 dargestellte Korrelation der mittleren Länge langsam gewachsener Frühholztracheiden mit entsprechenden Spätholztracheiden der einzelnen Bäume. Das bedeutet, die gewählte Trendlinie zeigt geringe Abweichungen von 0,08 bzw. 8 % von der idealen linearen Verbindung der Werte. Mit zusätzlicher Kenntnis des Korrelationskoeffizienten $R = +0,96$ kann abgeleitet werden, dass verhältnismäßig lange Frühholztracheiden mit ebenso verhältnismäßig langen Spätholztracheiden einhergehen.

Abbildung 14 Korrelation der mittleren Länge der Früh- und Spätholztracheiden [μm] langsam gewachsener Bäume (blau) und schnell gewachsener Bäume (rot) mit je zwei Messpunkten.



Zur aussagekräftigen Darstellung werden die Ergebnisse teilweise wie in Abbildung 15 als Box-Whisker-Plots dargestellt. Ablesbar sind die Verteilung der Messwerte charakterisierenden Größen Mittelwert, Median, Extrema (Maximum und Minimum), Quartile (1.: 0-25 %, 2.: 25-50 %, 3.: 50-75 % und 4.: 75-100 %), Spannweite (Maximum – Minimum) und Interquartilsabstand (3. – 2. Quartil). Analog zum Variationskoeffizienten aus der Standardabweichung zum Mittelwert beschreibt der Quartilsdispersionskoeffizient als Verhältnis aus Interquartilsabstand zum Median die relative Streuung der mittleren 50 % der Verteilung. Da einige Messreihen bei Ortsauflösung $25 \mu\text{m}$ den Verlauf der Eigenschaften innerhalb eines Jahrringes zeigen, doch nicht nach Früh- bzw. Spätholz getrennt werden können, werden aus Literaturkenntnissen abgeleitet die extremen Bereiche von Verteilungen als in guter Näherung repräsentativ angenommen. Dazu wurden die innerhalb der Spanne vom Minimum zum 10 % Quantil bzw. vom 90 % Quantil zum Maximum liegenden Werte genutzt, um Früh- bzw. Spätholz oder – je nach untersuchtem Merkmal – umgekehrt zu charakterisieren.

Abbildung 15 Box-Whisker-Plot zur Darstellung der Länge [µm] langsam und schnell gewachsener Frühholztracheiden aus Beispiel (1). Q 1/2/3/4: 1/2/3/4.Quartil.

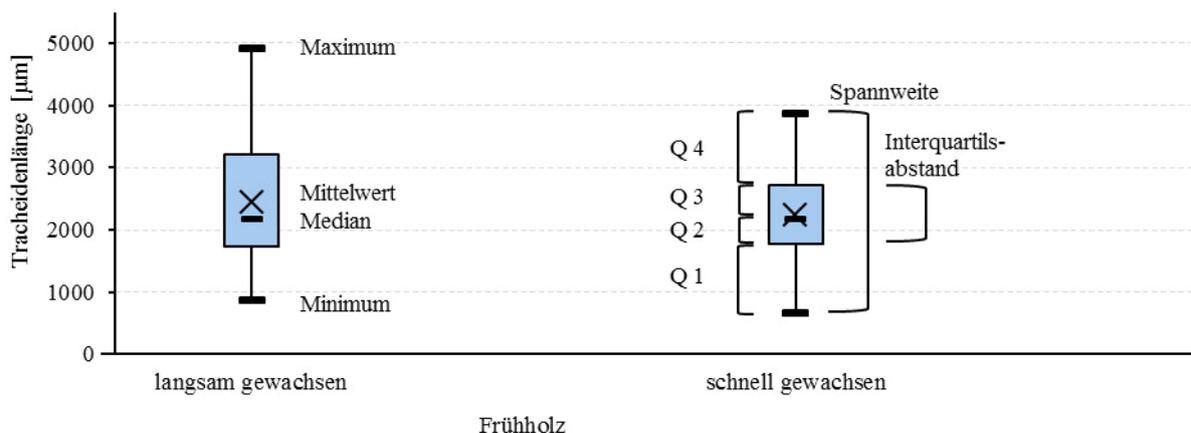


Tabelle 15 Werteübersicht für die Beispiele (1): Langsam und schnell gewachsene Frühholztracheiden und (2): Langsam und schnell gewachsene Spätholztracheiden.

Wuchsmodell		Beispiel (1) Frühholz		Beispiel (2) Spätholz	
		langsam	schnell	langsam	schnell
Mittlere Tracheidenlänge	[µm]	2445	2246	2794	2544
Standardabweichung	[µm]	876	650	987	743
Anzahl		418	425	422	422
Schiefe		0,60	0,23	0,18	0,64
Mittlerer Rang		518	455	508	423
Wölbung		2,29	2,40	34,79	73,19
Testwert Normalverteilung		33,70	10,16	17770,83	86647,23
Rangsumme		183891	171855	190928	165662
Bindungen		2 x Rang 16,5		keine	
		2 x Rang 46,5			
		2 x Rang 178,5			
		2 x Rang 291,5			
H-Wert		4,49590226802502		12,727	
D		0,99999996		1	
korrigierter H-Wert		4,49590244813841		12,727	
χ ² -Wahrscheinlichkeitswert		0,033976176		0,00036049	
Unterschied		signifikant		dezisiv	

Alle Berechnungen und Prüfungen wurden mit Microsoft Excel 2010 ausgeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Da viele der untersuchten Eigenschaften miteinander wechselwirken, werden die Ergebnisse der Untersuchungen und deren Diskussion gemeinsam dargestellt. Abzugrenzende Themenfelder sind die Anatomie des untersuchten Holzes und daraus abzuleitende, ausgesuchte physikalische und mechanische Eigenschaften einerseits und andererseits die Biochemie unter spezieller Würdigung der natürlichen Dauerhaftigkeit.

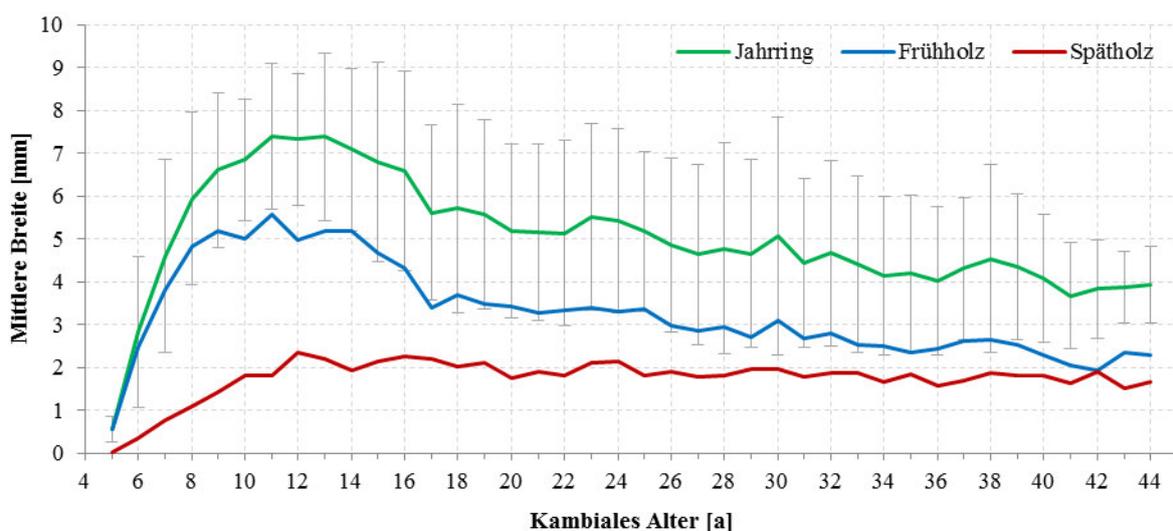
4.1 Anatomische Eigenschaften

Die Identifizierung juvenilen und adulten Holzes und die Beschreibung der anatomischen Eigenschaften über hierarchische Ebenen bieten Erklärungen für das physikalische und mechanische Verhalten des Holzes.

4.1.1 Jahrringbreite

Die mittlere Breite von 730 vermessenen Jahrringen der Bäume aus dem Standraumversuch beträgt $5 \pm 2,3$ mm, bei Extremwerten von 0,3 und 12,5 mm. Von eher feinen Jahrringen nahe dem Mark steigen die lebensjährlichen Mittelwerte der Jahrringbreite bis zur Kulmination des jugendlichen Durchmesserzuwachses im 11. Lebensjahr mit $7,4 \pm 1,7$ mm. Über die darauffolgenden 25 Lebensjahre sinken die Jahrringbreiten sukzessiv auf Werte um 4 mm ab dem 36. Lebensjahr. Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Jahrring-, Frühholz- und Spätholzbreite der Lebensjahre 5 bis 44.

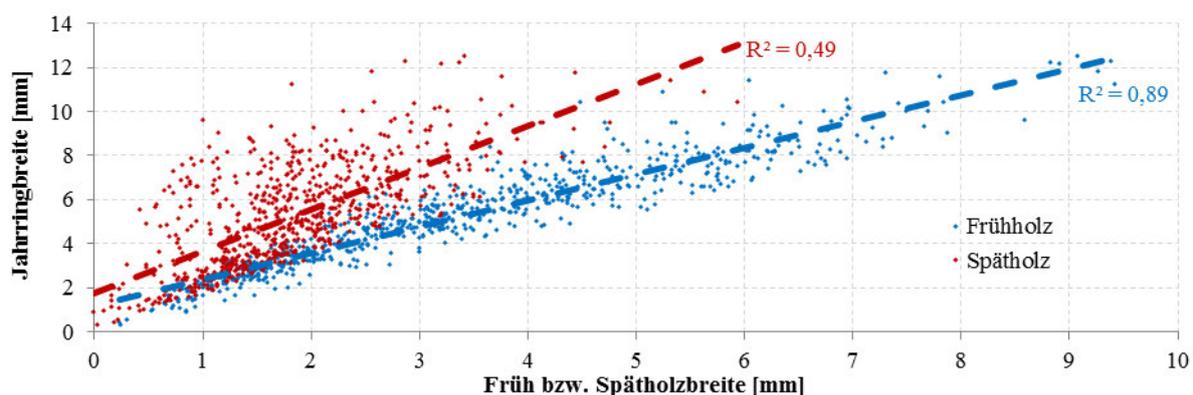
Abbildung 16 Mittlere lebensjährliche Frühholzbreite (blau) [mm], Spätholzbreite (rot) [mm] und Jahrringbreite (grün, mit Standardabweichung) [mm] im kambialen Alter [a]. $n_{kA5} = 2$, $n_{kA6} = 9$, $n_{kA7} = 15$, $n_{kA8-41} = 20$, $n_{kA42} = 15$, $n_{kA43-44} = 5$.



Es ist deutlich erkennbar, dass die Jahrringbreite maßgeblich von der Frühholzbreite bestimmt wird; die Abnahme der Jahrringbreiten im Alter geht einher mit geringeren Frühholzbreiten (GARTNER

et al. 2005). Wie aus Abbildung 17 ersichtlich, korreliert die Frühholzbreite mit einem Bestimmtheitsmaß von 89 % mit der Jahrringbreite. Auch die Spätholzbreite steigt bis zum 11. Lebensjahr und schwankt in den folgenden Lebensjahren konstant um $2 \pm 0,2$ mm. Dabei korreliert die Spätholzbreite mit einem Bestimmtheitsmaß von 49 % deutlich schwächer als die Frühholzbreite mit der Jahrringbreite.

Abbildung 17 Korrelation der Jahrringbreite [mm] mit Frühholzbreite (rot, $R^2 = 0,89$) [mm] und Spätholzbreite (blau, $R^2 = 0,49$) [mm]. $n_{\text{Frühholz}} = n_{\text{Spätholz}} = 730$.



Die vergleichende Darstellung der Wachstumsmodelle in Abbildung 18 zeigt, dass Unterschiede in der mittleren Jahrringbreite erst nach dem 9. Lebensjahr auftreten: aus Phasen langsamen Wachses resultieren feine Jahrringbreiten, während in Phasen schnellen Wachses grobe Jahrringe gebildet werden. Wechsel der Wuchsgeschwindigkeit von langsam zu schnell und umgekehrt sind nachzuvollziehen, der Beginn des Überganges liegt etwa bei einem kambialen Alter von 25 Jahren und fällt mit dem Beginn der Durchforstung von Standorten zusammen. Die Wachstumsmodelle ‚langsam-schnell‘ und ‚schnell-langsam‘ sind kaum geeignet zur Beschreibung der Eigenschaften des Kernholzes, da die lebensjährlichen Jahrringbreiten auch innerhalb des Wachstumsmodells stark variieren und die Wechsel der Wuchsgeschwindigkeit teilweise erst im Splintholz abgeschlossen sind. Diese Wachstumsmodelle und Wachstumsmodell ‚BHD 40‘ ergeben zusammen eine mittlere Wuchsgeschwindigkeit. Die lebensjährlichen Mittelwerte des Wachstumsmodells mittlerer Wuchsgeschwindigkeit gleichen zu- bzw. abzüglich der Standardabweichung etwa ab dem 17. Lebensjahr den mittleren lebensjährlichen Jahrringbreiten der Wachstumsmodelle ‚schnell‘ bzw. ‚langsam‘, wie in Abbildung 19 dargestellt. Schnell gewachsenes Holz zeigt somit eine mittlere Jahrringbreite von $7 \pm 1,3$ mm, während die mittlere Jahrringbreite langsam gewachsenen Holzes bei $4 \pm 1,5$ mm liegt. Zur Abgrenzung des adulten Holzes wird aufgrund der Korrelation der Jahrringbreite mit der Spätholzbreite das Merkmal Spätholzanteil genutzt. Demnach sind 68 % der Jahrringe der juvenilen Phase zuzuordnen. Das juvenile Holz unterscheidet sich mit einer mittleren Jahrringbreite von $6,2 \pm 2,4$ mm konklusiv vom adulten Holz, dessen Jahrringe im Mittel $4,8 \pm 2,1$ mm breit sind. Mit zunehmendem Abstand vom Mark steigt das Signifikanzniveau von Unterschieden zwischen den Jahrringen. So unterscheidet sich das juvenile

Kernholz mit im Mittel 6,3 mm breiten Jahrringen vom juvenilen Splintholz, dessen mittlere Jahrringbreite 3,9 mm beträgt. Außerdem besteht ein konklusiver Unterschied zwischen adultem Kern- bzw. Splintholz; die mittleren Jahrringbreiten sind 5,5 mm bzw. 4,1 mm. Die größeren Jahrringe der juvenilen Phase zeigen, dass die Bäume in der Jugend schnell gewachsen sind. Die juvenile Phase anhand grober Jahrringe zu identifizieren (PAUL 1960) ist als Umkehrschluss nicht zulässig, da waldbauliche Maßnahmen zur Unterdrückung des raschen Jugendwachstums der Douglasie eine feine Jahrringstruktur zur Folge haben können (WOBST & BECKER 1997). Die Mark-Jahrringe ausgenommen, liegt die Breite des marknächsten juvenilen Jahrringes aus einem 7. Lebensjahr bei 2,7 mm – dies ist charakteristisch für das insgesamt eher grobringige Holz der Versuchsbäume. Im Gegensatz zu anderem Nadelholz, bei dem die Sortiernorm DIN 4074-1 (2003) feinere Jahrringe fordert, gelten für die Douglasie Jahrringbreiten ≤ 8 mm bzw. ≤ 6 mm (S7/10 bzw. S13). Die Auswertung zeigt, dass 88 bzw. 265 Jahrringe über diesen Grenzwerten lagen, wobei 50 % bzw. 57 % dieser Jahrringe der juvenilen Phase entstammen. Hinsichtlich des Alterstrends offenbaren die mindestens 85 Jahre alten Bäume deutlich feinere Jahrringe (Abbildung 24), mit einer mittleren Jahrringbreite von 2,1 mm ab dem Kalenderjahr 2000.

Abbildung 18

Mittlere Jahrringbreite [mm] der Wuchsmodelle schnell (rot), BHD 40 (grün), schnell-langsam (hellrot), langsam-schnell (hellblau) und langsam gewachsen (blau) im kambialen Alter [a].

$n_{\text{Bäume}} (\text{Alle Modelle}) = 4$.

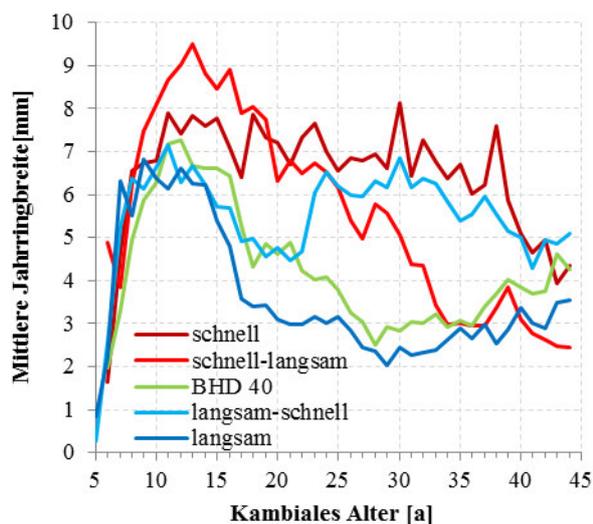
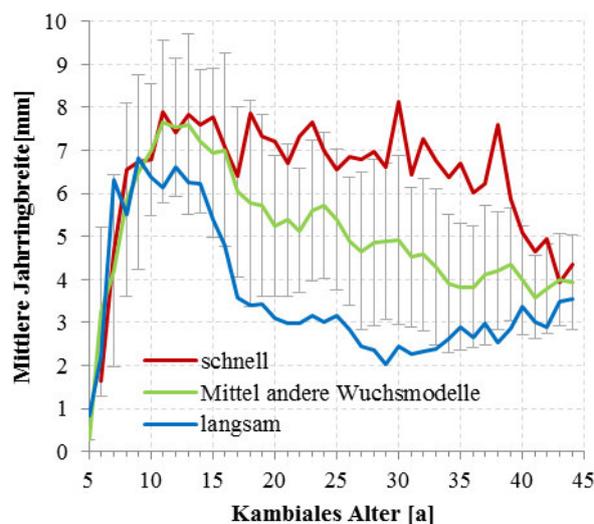


Abbildung 19

Mittlere Jahrringbreite [mm] der Wuchsmodelle schnell (rot), Mittel aus BHD 40, schnell-langsam und langsam-schnell (grün, mit Standardabweichung) und langsam (blau) im kambialen Alter [a]. $n_{\text{Bäume}} (\text{Mittelmodell}) = 12$, $n_{\text{Bäume}} (\text{langsam}) = n_{\text{Bäume}} (\text{schnell}) = 4$.



Unterschiede zwischen den mittleren Jahrringbreiten schnell und langsam gewachsener Bäume ähneln den von HAPLA (1981) dokumentierten Werten. Der für die Douglasie charakteristische Verlauf der

Jahrringbreite mit einer grobringigen juvenilen Phase (HAPLA 1981, GÖHRE 1958) und abklingenden Jahrringbreiten im Alter (BUSING & GARMAN 2002, DIMOCK II & HASKELL 1962) wird in früheren Untersuchungen (WOBST & BECKER 1997, SACHSSE & ROFFAEL 1993, HAPLA 1981, GÖHRE 1958) als der Wertholzerzeugung hinderlich angesehen. Eine Homogenisierung der Jahrringbreite mit Zielwerten kleiner als 3 mm durch waldbauliche Einflussnahme wird daher empfohlen (HAPLA 1981). Untersuchungen niederländischer Douglasie zeigen, dass gemäß der nationalen Standards definierte Jahrringbreiten auch in Europa erreicht werden können (POLMAN & MILITZ 1996).

4.1.2 Spätholzanteil

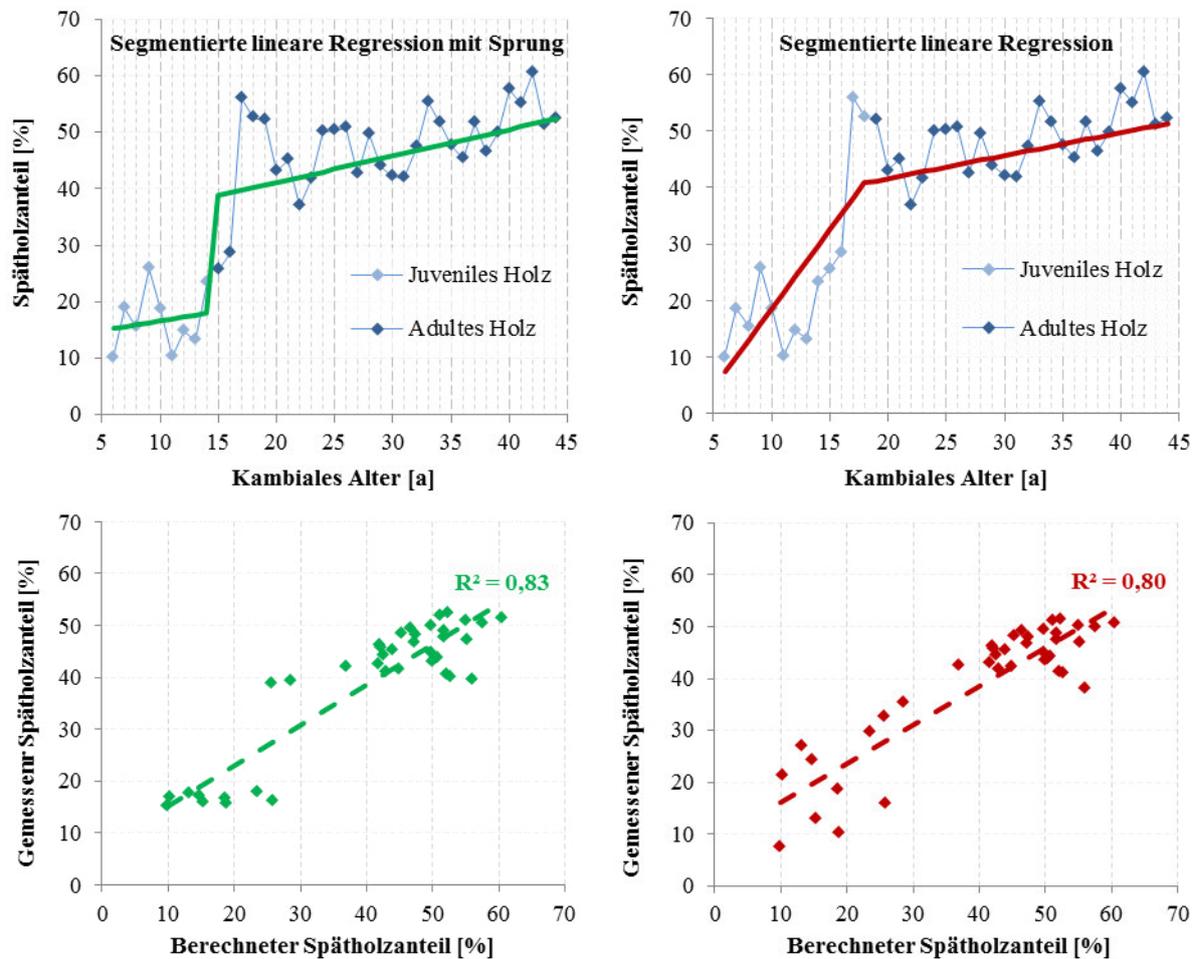
Wie bereits für die Jahrringbreite beschrieben, wird auch für den prozentualen Anteil des Spätholzes an der Jahrringbreite eine Auswertung nach dem kambialen Alter der Bäume vorgenommen. Die Abgrenzung von Früh- zu Spätholz ist besonders im jungen Lebensalter durch einen gleitenden Übergang beeinflusst – die mehrfachen Messungen eines jeden Radius stimmen weitgehend überein. Der mittlere prozentuale Spätholzanteil aus 730 Messungen beträgt $36 \pm 12 \%$. Minimale Spätholzanteile mit 11 % zeigen frühe Lebensjahre, maximale Werte von über 60 % finden sich über die gesamte Spanne der untersuchten Lebensjahre. Abbildung 20 stellt beispielhaft die Identifizierung juvenilen und adulten Holzes von Baum 19 aus Kandern anhand segmentierter linearer Regression dar. Aus den programmierten Unterstellungen, jedes Lebensjahr könne das Ende der juvenilen Phase markieren, folgen die gezeigten besten Vorschläge für die einfache bzw. die Berechnung mit Sprung zwischen dem juvenilen und adulten Segment. Die links dargestellten Diagramme zur segmentierten linearen Regression mit Sprung zwischen dem juvenilen und adulten Segment sprechen durch Berechnung mit den eingesetzten Koeffizienten (Formel 27) nach

$$\text{Spätholzanteil}_{i \text{ reg.}} = 13 + 0,3 \text{ Lebensjahr}_i + 0,1 (\text{Lebensjahr}_i - 14) D + 20,4$$

mit $D = 0$ für $\text{Lebensjahr}_i \leq 14$ und $D = 1$ für $\text{Lebensjahr}_i > 14$

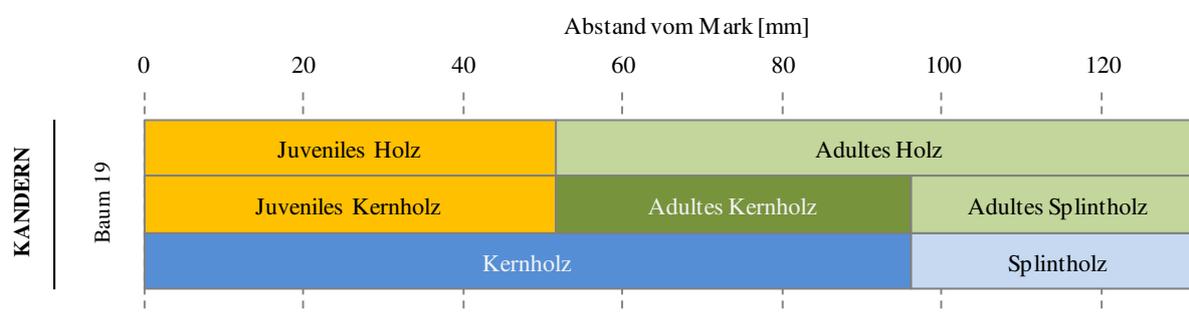
für ein Ende der juvenilen Phase im 14. Lebensjahr. Korreliert mit den gemessenen lebensjährlichen Spätholzanteilen weisen nach dieser Variante berechnete lebensjährliche Spätholzanteile die Summe der kleinsten Abweichungsquadrate von 1573 und ein Bestimmtheitsmaß von 83 % auf. Die rechts gezeichnete Berechnung ohne Sprung identifiziert das Ende der juvenilen Phase im 18. Lebensjahr. Dabei beträgt das die Summe der kleinsten Abweichungsquadrate der Korrelation gemessener und berechneter lebensjährlicher Spätholzanteile 1837 und das Bestimmtheitsmaß 80 %. Der Vergleich der Summen kleinster Abweichungsquadrate ergibt, dass für diesen Baum die Berechnung mit Sprung zu wählen ist und der Eintritt in die adulte Phase im 15. Lebensjahr liegt.

Abbildung 20 Identifizierung des juvenilen und adulten Holzes von Baum 19 aus Kandern. Links: Eintritt in die adulte Phase im 15. Lebensjahr, bestimmt durch segmentierte lineare Regression mit Sprung (grün, $R^2 = 83\%$, Summe kleinster Quadrate: 1573). Rechts: Eintritt in die adulte Phase im 18. Lebensjahr, bestimmt durch segmentierte lineare Regression (rot, $R^2 = 80\%$, Summe kleinster Quadrate: 1837)



Nach dieser Identifizierung juvenilen und adulten Holzes werden die beiden Phasen zusätzlich nach Kern- und Splintholz unterteilt. Für das vorhergehende Beispiel bedeutet dies, vom Lebensjahr des äußersten Kernholzjhring, dem 31. Lebensjahr, werden die 14 juvenilen Kernholz-Lebensjahre subtrahiert: das adulte Kernholz umfasst 17 Lebensjahre. Die restlichen Lebensjahre 32 bis 44 sind das adulte Splintholz. Da die Jahrringbreiten bekannt sind, können die radialen Ausmaße der Teilkollektive auch in absolut in Millimetern oder als prozentuale Anteile ausgedrückt werden. Zur Veranschaulichung der Berechnungen zeigt Abbildung 21 ein clustered-column-Diagramm für Baum19 aus Kandern, aus dem die Teilkollektive hervorgehen.

Abbildung 21 Darstellung des radialen Ausmaßes [mm] von Kern- und Splintholz, juvenilem und adultem Holz sowie juvenilem und adultem Kernholz und adultem Splintholz von Baum 19 aus Kandern.



Wird der für alle Bäume auf diese Weise errechnete Übergang vom juvenilen zum adulten Holz wie in Tabelle 16 gemittelt, beginnt die anhand des Merkmals Spätholzanteil identifizierte adulte Phase im 18. Lebensjahr ± 6 Jahre. Die Variation des Eintrittsalters in die adulte Phase reicht dabei vom 12. bis zum 31. Lebensjahr. Ausgedrückt in der Anzahl juveniler Jahrringe vom Mark, identifiziert der Spätholzanteil eine mittlere juvenile Phase von 12 Jahrringen, was einem mittleren Anteil an der Radiusbreite von 39 % gleichkommt. Aus der getroffenen Abgrenzung adulten Holzes ergibt sich ein mittlerer Spätholzanteil des juvenilen Holzes von 27 ± 12 %, der konklusiv niedriger ist als der für das adulte Holz bestimmte Mittelwert von 41 ± 9 %. Dieser Wert stimmt überein mit dem für nordwestdeutsche Douglasien dokumentierten konstanten Spätholzanteil ab einem kambialen Alter von 18 Jahren (KNIGGE 1958) und dem Mittelwert des äußeren Holzes 22-41-jähriger nordamerikanischer Douglasien (LACHENBRUCH et al. 2010). Der Mittelwert ab dem 10. Lebensjahr ist mit 39 % deutlich höher als für 42-78-jährige englische Douglasie mit 27 % bestimmt (BAWCOMBE 2012).

Tabelle 16 Eigenschaften anhand des Merkmals Spätholzanteil identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.

Segmentierte lineare Regression Spätholzanteil		Juveniles Kernholz	Juveniles Splintholz	Juveniles Holz	Adultes Kernholz	Adultes Splintholz	Adultes Holz
Mittlere Jahrringanzahl	[-]	11 ± 6	3	11 ± 6	13 ± 6	13 ± 2	25 ± 6
Mittleres höchstes kambiales Alter	[kA]	17 ± 6	30	17 ± 6	30 ± 2	42 ± 1	42 ± 1
Mittlerer Anteil an der Radiusbreite	[%]	39	0	39	34	27	61
Mittlerer Spätholzanteil	[%]	27 ± 12	42 ± 1	27 ± 12	39 ± 9	43 ± 7	41 ± 9

Da eine Vielzahl externer Einflüsse den Übergang vom juvenilen zum adulten Holz beeinflussen (LINDSTRÖM et al. 1998), ist es lediglich möglich, den mittleren juvenilen Anteil der Radiusbreite mit

dem mittleren Standraum in Verbindung zu bringen. Demnach fällt mit einem Standraum von 2,5 m² ein mittlerer Anteil von 29 % juvenilem Holz zusammen – mit zunehmendem Standraum steigt der mittlere Anteil juvenilen Holzes in der Reihe 5 m² und 38 %, 10 m² und 35 %, sowie 20 m² und 48 % (KARLSSON et al. 2013). Wird das adulte Holz rechnerisch nach Kern- und Splintholz unterteilt, bestehen konklusive Unterschiede dieser Teilkollektive zum juvenilen Holz und signifikante Unterschiede zum adulten Holz. Das adulte Splintholz unterscheidet sich durch einen konklusiv höheren mittleren Spätholzanteil vom adulten Kernholz – damit steigen die Spätholzanteile auch nach dem Eintritt in die adulte Phase leicht an. Der Anteil juvenilen Splintholzes ist marginal, da nahezu das gesamte juvenile Holz verkernt ist. Das Niveau relativ konstanter Spätholzanteile der adulten Phase unterscheidet sich mit der Wuchsgeschwindigkeit. In Abbildung 22 ist erkennbar, dass sich die Wuchsmodelle ‚langsam‘ und ‚schnell-langsam‘ durch einen höheren Spätholzanteil von den anderen Wuchsmodellen abheben, deren Spätholzanteile bei etwa 40 % liegen. So zeigt Wuchsmodell ‚langsam‘ ab dem 18. Lebensjahr Spätholzanteile um 46 %, was in Abbildung 23 durch den Vergleich mit Wuchsmodell ‚schnell‘ und dem Mittel der übrigen drei Wuchsmodelle zum Ausdruck kommt. Zur statistischen Prüfung und Absicherung reicht der lebensjährliche Stichprobenumfang von 4 : 16 Werten allerdings nicht aus.

Abbildung 22

Mittlerer lebensjährlicher Spätholzanteil [%] der Wuchsmodelle schnell (rot), BHD 40 (grün), schnell-langsam (hellrot), langsam-schnell (hellblau) und langsam gewachsen (blau) im kambialen Alter [a].

$n_{\text{Bäume}} (\text{alle Modelle}) = 4$.

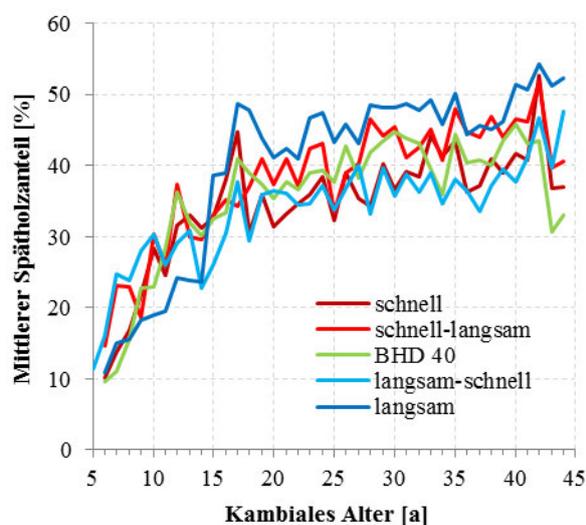
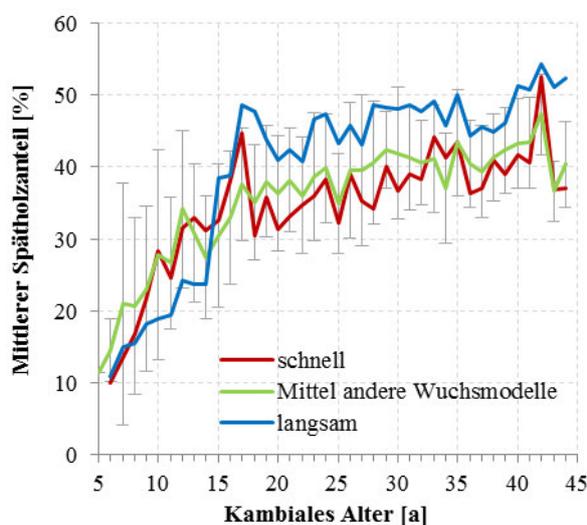


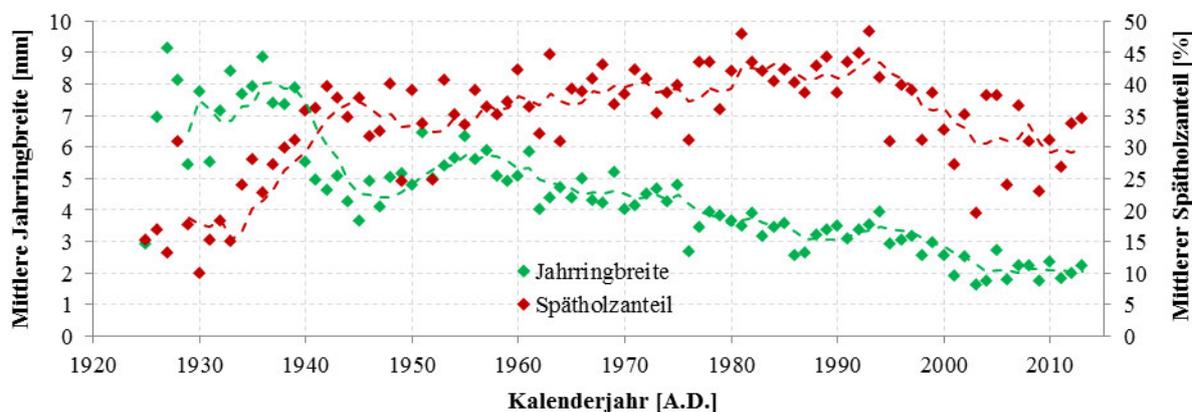
Abbildung 23

Mittlerer lebensjährlicher Spätholzanteil [%] der Wuchsmodelle schnell (rot), Mittel aus BHD 40, schnell-langsam und langsam-schnell (grün, mit Standardabweichung) und langsam (blau) im kambialen Alter [a]. $n_{\text{Bäume}} (\text{Mittelmodell}) = 12$, $n_{\text{Bäume}} (\text{langsam}) = n_{\text{Bäume}} (\text{schnell}) = 4$.



Die älteren Bäume aus Kandern zeigen ab 1977 (mittlere Jahrringanzahl zum Mark: 49) mittlere kalenderjährliche Spätholzanteile von 43 %, die ab 1994 (mittlere Jahrringanzahl zum Mark: 66) um zehn Prozentpunkte abfallen (Abbildung 24). Aus dem radialen Verlauf dieser Bäume unbekanntem Hintergrundes ist allerdings keine gesicherte Hypothese abzuleiten. Übereinstimmend zu früheren Untersuchungen ist der Übergang vom Früh- zum Spätholz in der juvenilen Phase gleitend (SCHWEINGRUBER & BAAS 2011, MCKIMMY 1959, GÖHRE 1958). Die mittleren Spätholzanteile des adulten Holzes gleichen den in der Literatur genannten Werten für einheimische Anbauten von 42 bis 45 % (PECHMANN 1963, HAPLA 1981, GÖHRE 1958).

Abbildung 24 Mittlere Jahrringbreite (grün, mit gleitendem Durchschnitt von fünf Vorjahren) [mm] und mittlerer Spätholzanteil (rot, mit gleitendem Durchschnitt von fünf Vorjahren) [%] von älteren Bäumen in Kalenderjahren [A.D.]. $n_{\text{Bäume}} = 4$.



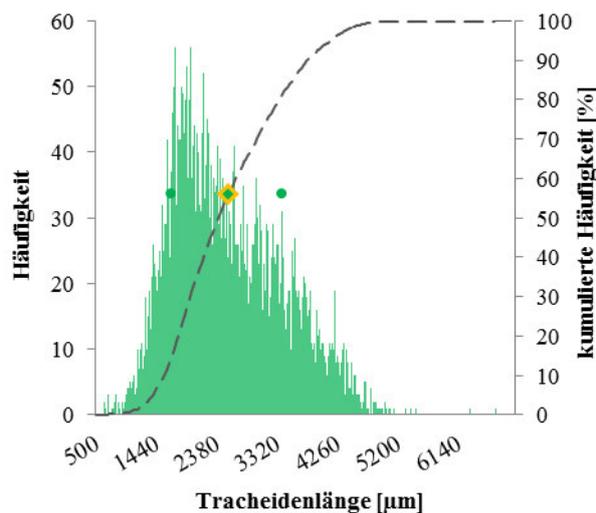
4.1.3 Tracheidenlänge

Die mittlere Länge von 4207 gemessenen intakten Tracheiden beträgt $2551 \pm 861 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 34 \%$. Da die Standardabweichung des Mittelwerts etwa 67 % des Interquartilsabstandes von 1293 μm umfasst, markiert die Spannweite von 6080 μm eine starke Streuung. Globale Extrema der Verteilung finden sich in Baum 122 aus Kandern: mit einer Länge von 625 μm im Frühholz des 8. Lebensjahres bzw. von 6706 μm im Spätholz des 29. Lebensjahres. Sowohl die Verteilung aller vermessenen Tracheiden, als auch die Verteilungen von Teilkollektiven sind – wie in Abbildung 25 erkennbar – rechtsschief und damit nicht normalverteilt. Der globale Mittelwert ist nur begrenzt mit bekannten Werten (MEGRAW 1986, PECHMANN & COURTOIS 1970, GÖHRE 1958, BAILEY 1920, LEE & SMITH 1916) für Douglasie vergleichbar, da die Proben verschiedenen kambialen Alters, verschiedener Höhe im Stamm, verschiedenen Standraumes der Bäume sind. Aus früheren Arbeiten geht hervor, dass die Tracheidenlänge diesen Einflussgrößen unterworfen ist (ANDERSON 1951, LEE & SMITH 1916). Allerdings ist eine Ähnlichkeit zum in 5,3 m Höhe, die Lebensjahre 14-34 repräsentierenden Mittelwert von 2360 μm (HAPLA 1996) gegeben. Im Vergleich der vier Standorte sind die Tracheiden der Bäume aus Löwenstein signifikant länger als die Tracheiden der Standorte Kandern und Ehingen, während alle weiteren Vergleiche keine Unterschiede in der Tracheidenlänge

aufweisen. Nichtsdestotrotz ist die Tendenz zu längeren Tracheiden auf dem schlechtesten Standort erkennbar (KENK & WEISE 1983). Hinsichtlich des Unterschiedes der Tracheidenlänge innerhalb der Vegetationsperiode ergeben sich mit einer mittleren Länge von 2702 ± 869 konklusiv längere Tracheiden im Spätholz: die mittlere Tracheidenlänge des Frühholzes beträgt $2400 \pm 826 \mu\text{m}$, was ein Verhältnis der Mittelwerte von 1 : 1,13 bedeutet. Längere Tracheiden als das Frühholz zeigt auch das Spätholz einzelner Bäume, wobei die Unterschiede bei vier Bäumen signifikant und bei jeweils fünf Bäumen dezisiv bzw. konklusiv sind. Diese Unterschiede zwischen den Früh- und Spätholztracheiden stimmen mit früheren Untersuchungen an Douglasien überein (DE KORT 1990, LEE & SMITH 1916) – mit einer Ausnahme (GERRY 1916). Im Vergleich zu Längen nordamerikanischer Früh- bzw. Spätholztracheiden von 4,5 mm bzw. 5,0 mm sind die Tracheiden des untersuchten Holzes deutlich kürzer (BISSET, I. J. W. & DADSWELL 1950). Die Fähigkeit der prosenchymatischen Kambiuminitialen, zwischen Früh- und Spätholzzonen wechselnd kürzere und längere Tracheiden bilden zu können, wird zurückgeführt auf den Winkel der neu gebildeten, trennenden Zellwand während der pseudotransversalen Teilung (BANNAN 1967).

Abbildung 25

Absolute Häufigkeit (grün, $n = 4207$) [-] und kumulierte Häufigkeit (rot) [%] der Tracheidenlänge [μm] aus mark- und splintnahen Kernholzbereichen in 20 μm -Klassen mit Mittelwert (Raute) und Standardabweichung (Punkte).

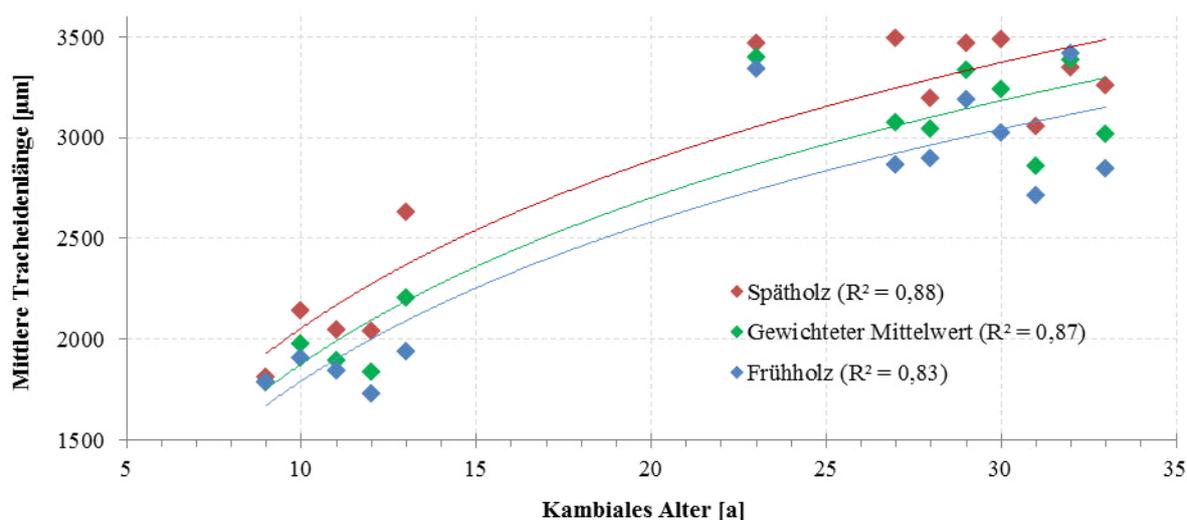


Tracheiden sind jeweils etwa 2 mm länger (BAILEY 1920). Nach dem Abschluss der Durchmesserzunahme findet lediglich Spitzenwachstum statt (WAGENFÜHR 1989), woraus die teilweise im untersuchten Holz beobachteten Vergabelungen der Zellenden resultieren (DE KORT 1990). Ein Korrelationskoeffizient von -0,57 für die Beziehung zwischen der mittleren

Dabei resultieren aus einer langen, eher vertikal ausgerichteten Trennwand längere Zellen, während annähernd horizontale Trennwände kürzere Tracheiden hervorbringen. So können aus derselben Xylemmutterinitiale Tracheiden verschiedener Länge und Volumens abgetrennt werden. Eine weitere Ursache für die Zunahme der Tracheidenlänge im Verlauf der Vegetationsperiode liegt in der negativen Korrelation zwischen der antiklinen Teilungsfrequenz und der Zelllänge: Im Frühjahr werden viele Zellen gebildet, wonach die Teilungsfrequenz zum Sommer abnimmt (BISSET, I. J. W. & DADSWELL 1950). Die Verlängerung der neu gebildeten Xylemelemente nach der Teilung ist gering. Bei *Pseudotsuga taxifolia* (Lamb.) Britton. gleicht sich die mittlere Länge von Kambiuminitialen und Tracheiden – nur die Extrema der

Tracheidenlänge und der Jahrringbreite zeigt übereinstimmend mit der Untersuchung rheinland-pfälzischer Douglasie die Zunahme der Tracheidenlänge mit der Senkung der Teilungsfrequenz des Kambiums (PECHMANN & COURTOIS 1970). Andere Untersuchungen werten teilweise gleichläufig beobachtete Abnahmen beider Größen als zufällig oder erkennen keinen Zusammenhang (DE KORT 1990). Neben der Zunahme der Tracheidenlänge innerhalb einer Vegetationsperiode nimmt die Tracheidenlänge auch mit dem kambialen Alter zu. Die beprobten Jahrringe zeigen eine Variation der Lebensjahre von 9-13 bzw. 23-33 und ergeben einen Verlauf mit dem kambialen Alter. Die mittleren Tracheidenlängen des Früh- und Spätholzes eines Jahrringes werden mit den korrespondierenden Früh- und Spätholzanteilen gewichtet, dies ergibt die mittlere Tracheidenlänge des Jahrringes. Abbildung 26 zeigt die Tracheidenlänge des Früh- und Spätholzes und den gewichteten Mittelwert der Lebensjahre mit einer variierenden Anzahl lebensjährig akkumulierter Jahrringe. Durch die Wahl logarithmischer Regressionen betragen Bestimmtheitsmaße des Alterstrends 83 % für das Frühholz und 88 % für das Spätholz. Diese Ausgleichsfunktionen ähneln Verläufen, die Tracheidenlängen von Douglasien aus *second-growth* beschreiben (FABRIS 2000, JOZSA & MIDDLETON 1994) und schließen nicht aus, dass die Tracheidenlänge in späteren Lebensjahren weiter zunimmt (GERRY 1916).

Abbildung 26 Mittlere Tracheidenlänge des Spätholzes (rot, $R^2 = 0,88$), des Frühholzes (blau, $R^2 = 0,83$) und anteilig gewichtet der Jahrringe (grün, $R^2 = 0,87$) [μm] und logarithmische Regressionen im kambialen Alter [a]. Anzahl der repräsentierten Jahrringe für Messpunkte lebensjährlicher Werte: $n_{kA9} = 2$, $n_{kA10} = 6$, $n_{kA11} = 7$, $n_{kA12} = 4$, $n_{kA13} = 1$, $n_{kA23} = 1$, $n_{kA27} = 1$, $n_{kA28} = 5$, $n_{kA29} = 3$, $n_{kA30} = 5$, $n_{kA31} = 1$, $n_{kA32} = 1$, $n_{kA33} = 3$.



Die Auswertungen zeigen, dass eine Identifizierung des Überganges vom juvenilen zum adulten Holz anhand der gemessenen Tracheidenlängen nicht möglich ist (BENDTSEN 1978), weil von jedem Baum nur die Tracheidenlänge je eines mark- bzw. splintnahen Jahrringes vorliegt. Untersuchungen an 27-33 Jahre alten amerikanischen Küstendouglasien dokumentieren einen linearen Korrelationskoeffizienten

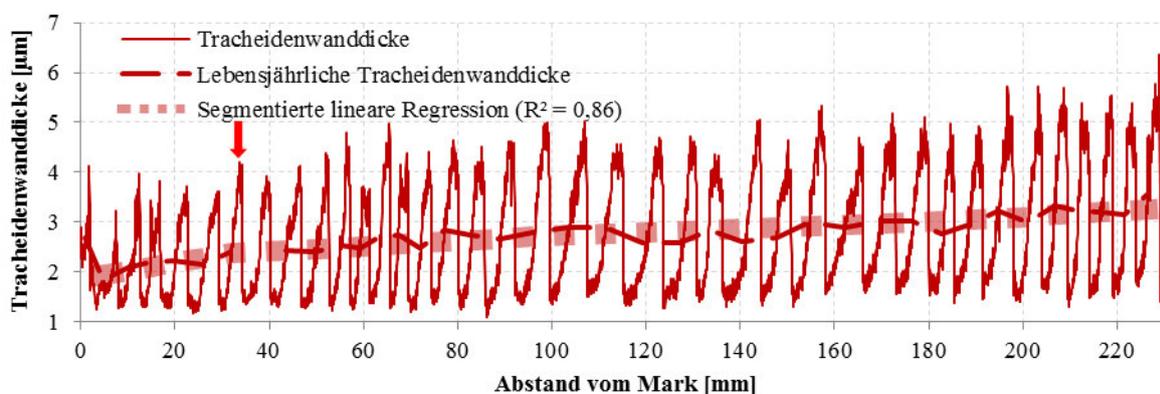
von 94 % zwischen Tracheidenlänge und Mikrofibrillenwinkel (ERICKSON & ARIMA 1974). Analog gilt für die Korrelation der gewichteten mittleren Tracheidenlänge mit dem mittleren Mikrofibrillenwinkel der jeweiligen Lebensjahre ein Bestimmtheitsmaß von 81 %. Da die radiale Position der korrelierten Werte eindeutig bestimmt ist, wird davon ausgegangen, dass eine Aussage zum Alterstrend zulässig ist. Die anhand des Merkmals Mikrofibrillenwinkel identifizierte adulte Phase wird baumweise auf die Tracheidenlänge übertragen, so dass die Tracheiden des fünften Jahrringes vom Mark als juvenil gelten. Die vermessenen Tracheiden des äußersten Kernholzjahrringes stammen mit Ausnahme von zwei Bäumen aus der adulten Phase. Weiter folgt, dass die im durchschnittlich 30. Lebensjahr gebildeten adulten Kernholztracheiden mit einer mittleren Länge von $3154 \pm 735 \mu\text{m}$ konklusiv länger sind, als die im durchschnittlich 12. Lebensjahr gebildeten juvenilen Tracheiden, die im Mittel $2072 \pm 619 \mu\text{m}$ messen. Das Verhältnis der mittleren Tracheidenlänge juvenilen zu adulten Kernholzes beträgt 1 : 1,5 und ist somit ausgeprägter als das Verhältnis der Mittelwerte der Tracheidenlänge von Früh- und Spätholz. Wie zwischen den gewichteten Jahrringmittelwerten bestehen konklusive Unterschiede zwischen der mittleren Tracheidenlänge des juvenilen und adulten Früh- bzw. Spätholzes. Anhand der Mittelwerte ist erkennbar, dass die akkumulierten Früh- und Spätholztracheidenlängen im juvenilen Holz eher dem Frühholz ähneln, was auf einen mittleren Spätholzanteil von 28 % zurückzuführen ist. Im adulten Holz liegt der Spätholzanteil bei 41 %, daher tendiert der akkumulierte Mittelwert nur leicht zur mittleren Frühholztracheidenlänge. Wie auch für den Längenunterschied der Früh- und Spätholztracheiden ist für die altersabhängige Zunahme der Tracheidenlänge die Frequenz der pseudotransversalen Teilungen von Kambiuminitialen in der juvenilen Phase verantwortlich. Die generelle, mit dem Umfangzuwachs einhergehende Senkung der Teilungsfrequenz in der adulten Phase resultiert in relativ mehr Zeit zum Ausdifferenzieren der Tracheiden (PHILIPSON & BUTTERFIELD 1968). Außerdem unterliegt das Kambium der Alterung, wobei die Länge der Initialen zunimmt und die Anzahl kürzerer Initialen durch Absterben oder Wandlung zu Holzstrahlinitialen sinkt. Frühere Arbeiten an Douglasie dokumentieren einhellig die radiale Zunahme der Tracheidendimensionen mit zunehmendem Alter (DE KORT 1990, SCHULTZE-DEWITZ & GÖTZE 1973, ANDERSON 1951, LEE & SMITH 1916). Verantwortlich für die Länge der Tracheiden sind somit größtenteils Art und Rate der pseudotransversalen Zellteilungen der Xylemmutterinitialen und in geringerem Ausmaß die genetische Disposition und exogene Einflüsse, die auf den radialen Zuwachs wirken (BANNAN 1967). Insofern bietet sich der Vergleich der Tracheidenlänge schnell und langsam gewachsener Bäume an. Der ermittelte signifikante bzw. dezisive Unterschied zwischen langsam und schnell gewachsenen Früh- bzw. Spätholztracheiden zeigt (3.3), dass langsamer Wuchs längere Tracheiden zur Folge hat (WAGENFÜHR 1989). Auch die Beeinflussung der Wuchsdynamik durch den Standraum stellt einen weiteren Fall des Wirkens der pseudotransversalen Teilungsrate dar. Übereinstimmend mit den beschriebenen Ergebnissen dokumentieren ERICKSON & HARRISON (1974) kürzere Tracheiden bei gedüngten Douglasien oder genereller, LEE & SMITH (1916) längere Tracheiden bei langsam

gewachsenen Douglasien. Nach Untersuchungen von KARLSSON et al. (2013) an *P. sylvestris* sinkt der anhand der Tracheidenlänge identifizierte Anteil juvenilen Holzes mit abnehmendem Standraum, so dass eine waldbauliche Beeinflussung des Ausmaßes juvenilen Holzes möglich ist.

4.1.4 Tracheidenwanddicke

Bei einer lokalen Auflösung von 25 μm beträgt die globale mittlere Tracheidenwanddicke $2,7 \pm 1,1 \mu\text{m}$. Dabei variiert die Tracheidenwanddicke analog zum Mikrofibrillenwinkel einerseits innerhalb der Vegetationsperiode, andererseits mit dem Alter der Bäume (RATHGEBER et al. 2006). Im Frühling werden mit etwa $1,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$ eher dünnwandige, und im Sommer mit circa $4,6 \pm 0,6 \mu\text{m}$ dickwandige Tracheiden gebildet. Exemplarisch zeigt Abbildung 27 den Früh-SpätHolzkontrast bei Ortsauflösung 25 μm , lebensjährliche Mittelwerte und die segmentierte lineare Regression der Tracheidenwanddicke von Baum 222 aus Kandern. Aus linearer Regression berechnet, nimmt die Tracheidenwanddicke jedes Lebensjahr um $0,00459 \mu\text{m}$ zum Vorjahr zu. Bezogen auf die theoretische Tracheidenwanddicke des Markes entspricht dies einer Zunahme von 0,2 %.

Abbildung 27 Tracheidenwanddicke [μm], lebensjährliche Tracheidenwanddicke (schmal gestrichelt) [μm] und segmentierte lineare Regression (breit gestrichelt, $R^2 = 0,86$) [μm] mit Abstand vom Mark [mm] von Baum 222 aus Kandern. Anhand des Merkmals Tracheidenwanddicke identifizierter Eintritt in die adulte Phase im 13. Lebensjahr (Pfeil).



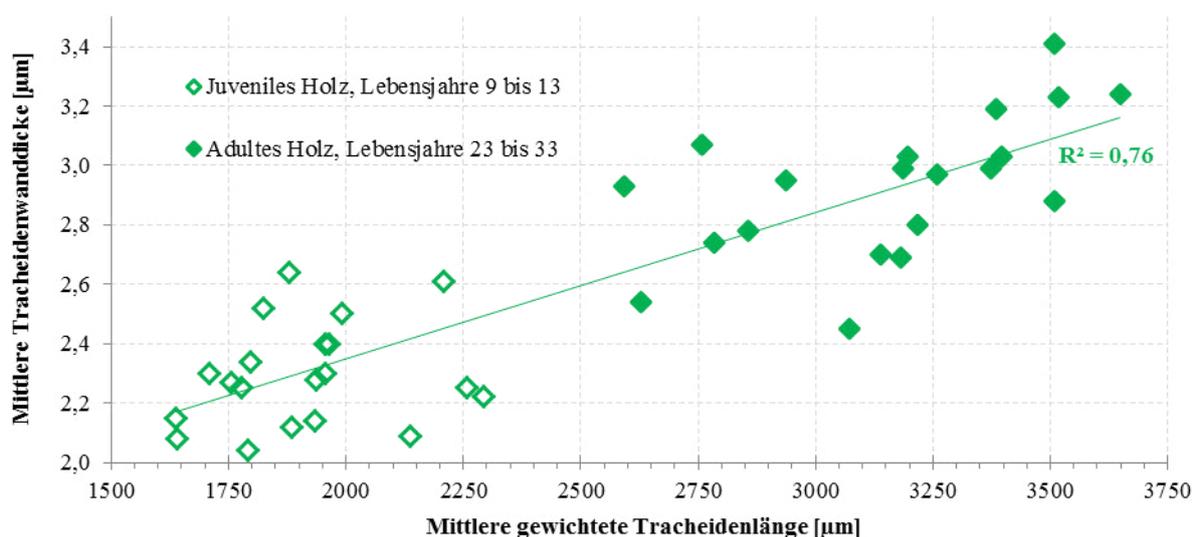
Die segmentierte lineare Regression der mittleren lebensjährlichen Tracheidenwanddicken identifiziert das mittlere Eintrittsalter in die adulte Phase in Brusthöhe im 20. Lebensjahr ± 4 Jahre, wie aus Tabelle 17 hervorgeht. Davor werden im Mittel 13 juvenile Jahrringe gebildet, die einen mittleren Anteil von 45 % der Radiusbreite einnehmen. Die mittlere Tracheidenwanddicke juvenilen Holzes beträgt $2,4 \pm 0,9 \mu\text{m}$ – es besteht ein konklusiver Unterschied zur Wanddicke der Tracheiden adulten Holzes mit im Mittel $2,8 \pm 1,2 \mu\text{m}$. Ebenso unterscheiden sich die Tracheidenwanddicken des adulten Kern- und Splintholzes konklusiv voneinander. Insbesondere die Mittelwerte der Teilkollektive veranschaulichen die sukzessive Zunahme der Tracheidenwanddicke im kambialen Alter.

Tabelle 17 Eigenschaften anhand des Merkmals Tracheidenwanddicke identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.

Segmentierte lineare Regression Mikrofibrillenwinkel		Juveniles Kernholz	Juveniles Splintholz	Juveniles Holz	Adultes Kernholz	Adultes Splintholz	Adultes Holz
Mittlere Jahringanzahl	[-]	13 ± 4	0	13 ± 4	10 ± 5	13 ± 2	23 ± 4
Mittleres höchstes kambiales Alter	[kA]	19 ± 4	0	19 ± 4	29 ± 2	42 ± 1	42 ± 1
Mittlerer Anteil an der Radiusbreite	[%]	45	0	45	28	27	55
Mittlere Tracheidenwanddicke	[µm]	2,4 ± 0,9	0	2,4 ± 0,9	2,7 ± 1,1	3 ± 1,2	2,8 ± 1,2

Abbildung 28 zeigt die Korrelation der mittleren, aus Früh- und Spätholz gewichteten Tracheidenlänge mit der mittleren Tracheidenwanddicke. Eine deutliche Zunahme der Wanddicke mit der Länge der Tracheiden ist erkennbar. Dabei erscheint es gemäß der ermittelten Tracheidenwanddicke des juvenilen Holzes unerheblich, ob die Tracheiden dem juvenilen oder adulten Holz entstammen. In den Lebensjahren 9 bis 13 werden die eher dünnwandigen Tracheiden aller 20 Bäume der juvenilen Phase zugeordnet. Identifiziert anhand des Merkmals Tracheidenwanddicke repräsentieren die Werte der Lebensjahre 23 bis 33 das adulte Holz.

Abbildung 28 Mittlere Tracheidenwanddicke [µm] und mittlere gewichtete Tracheidenlänge [µm] des juvenilen Holzes (leere Punkte, n = 20) und adulten Holzes (gefüllte Punkte, n = 20).



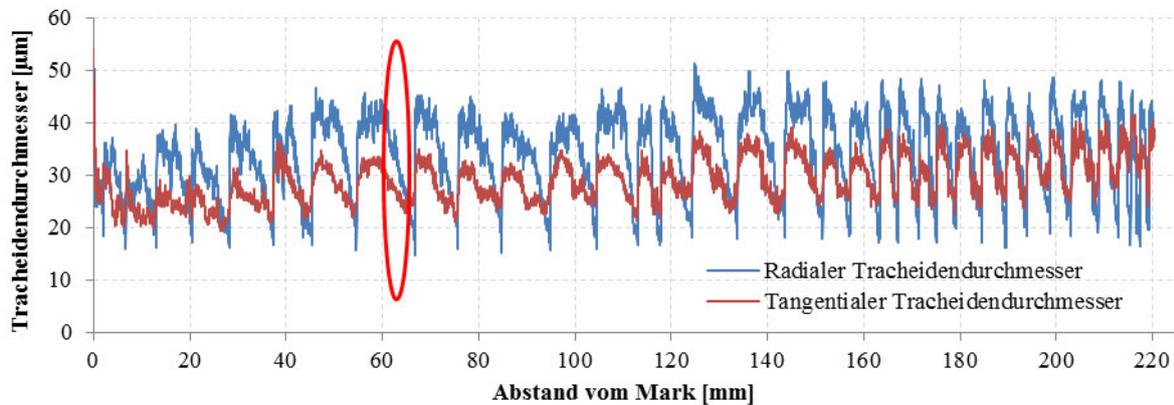
Für den Zusammenhang zwischen Länge und Wanddicke der Tracheiden gilt ein Bestimmtheitsmaß von 76 %. Hingegen beträgt die Korrelation der Wanddicke mit dem radialen bzw. tangentialen Durchmesser 54 % bzw. 21 %, was zurückzuführen ist auf eine begrenzte Gültigkeit des Zusammenhanges in Bereichen nahe der Jahringgrenzen (FENGEL & STOLL 1973). Zeigen die lebensjährlichen Verläufe der Wanddicken der Wachstumsmodelle ‚schnell‘ und ‚langsam‘ eine Tendenz,

so ergibt der Vergleich bei Ortsauflösung 25 μm , dass die Tracheiden langsam gewachsener Bäumen im Mittel um 0,1 μm konklusiv dickwandiger sind. Ebenso resultieren konklusive Unterschiede aus Vergleichen der Wachstumsmodelle ‚langsam‘ bzw. ‚schnell‘ mit den akkumuliert eine intermediäre Wanddicke zeigenden Wachstumsmodellen ‚langsam-schnell‘, ‚schnell-langsam‘ und ‚BHD 40‘. Unterschiede zwischen den Tracheidenwanddicken der Bäume von verschiedenen Standorten sind nicht signifikant. Für das Früh- und Spätholz berechnete Wanddicken sind deutlich geringer als korrespondierende Werte um 3,3 μm bzw. 6,5 μm von 64-73-jährigen nordostdeutschen Douglasien (GÖHRE 1958) oder 3,5 μm bzw. 7,8 μm von einem 35-jährigen Baum aus Nordost-Frankreich (RATHGEBER et al. 2006). Gleichsam dicker sind die Tracheiden amerikanischer Anbauten mit 3 μm bzw. 6 μm (WAGENFÜHR & SCHEIBER 1985).

4.1.5 Tracheidendurchmesser

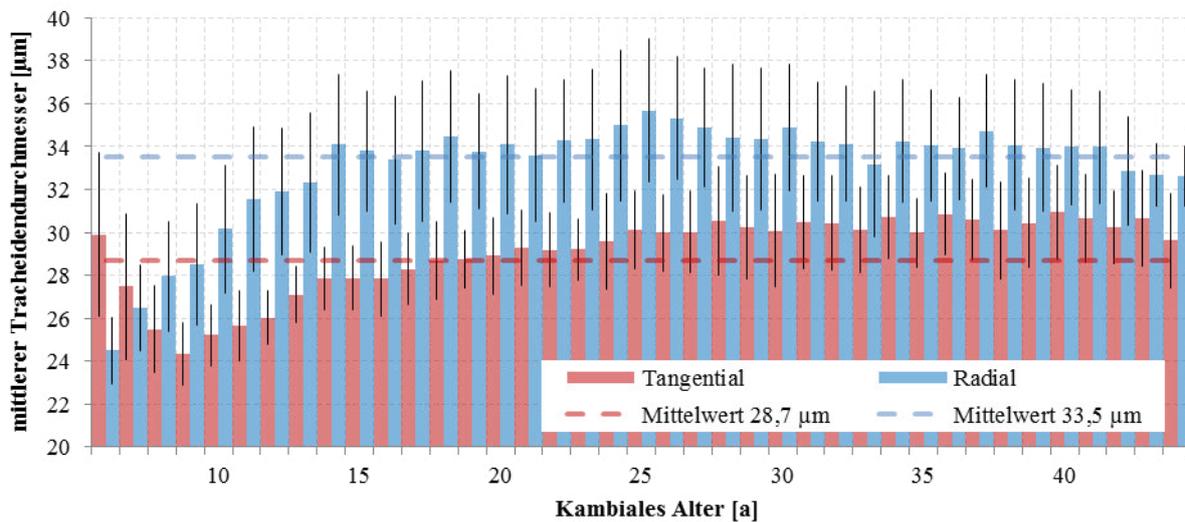
Die Mittelwerte des tangentialen und radialen Tracheidendurchmessers betragen $29 \pm 2,8 \mu\text{m}$ bzw. $33 \pm 3,7 \mu\text{m}$, wobei sich die Variationskoeffizienten mit $\pm 10 \%$ bzw. $\pm 11 \%$ nur gering unterscheiden. Innerhalb eines Jahrringes ist der Durchmesserunterschied zwischen Früh- und Spätholz ausgeprägter in der radialen Dimension (FENGEL & STOLL 1973). Daraus folgt, dass sich die radiale Dimension bei mehrheitlich eher gleitenden Früh-Spätholzübergängen schneller ändert, was die Steigungen in Abbildung 29 zeigen. Werden zu Beginn der Vegetationsperiode weite, in radialer Richtung etwa 46 μm messende Tracheiden gebildet, sinkt dieses Maß auf circa 20 μm zum Ende des Jahrringes. In tangentialer Richtung beträgt der Tracheidendurchmesser circa 35 μm in der Frühholzzone und 24 μm im Spätholz. Im Frühholz sind die radialen Tracheidendurchmesser bis zu 10 μm größer als die tangentialen Tracheidendurchmesser, wohingegen im Spätholz die tangentialen Durchmesser geringfügig größer sind. Ein konklusiver Unterschied zwischen der radialen und tangentialen Dimension zeigt, dass die saisonale Anpassung an die zu erfüllende Wasserleitfunktion in größerem Ausmaß durch Ausdifferenzieren der radialen Tracheidendimension erfolgt, während in tangentialer Richtung nur eine geringe Dimensionszunahme festzustellen ist (PANSHIN & DE ZEEUW 1980). Neben der intraanuellen Variation steigen die Frühholztracheidendurchmesser an, und zeigen nach dem ersten Fünftel bis Viertel der Radien kontinuierliche Werte. Bei Ortsauflösung 25 μm korrelieren die radialen und tangentialen Durchmesser mit einem Bestimmtheitsmaß von 55 %. Die dabei auftretenden, ausschließlich radialen Ausreißer sind durch die Abhängigkeit der Weite radialer Tracheidendurchmesser von der Nährstoffversorgung eines Baumes zu erklären (DÜNISCH 1993).

Abbildung 29 Radiale (blau) und tangentiale (rot) Tracheidendurchmesser [μm] mit zunehmendem Abstand zum Mark [mm] von Baum 94 aus Ehingen. Rote Hervorhebung: Vergleich der Änderung der radialen und tangentialen Durchmesser anhand der Steigung.



Werden die Tracheidendurchmesser bei Ortsauflösung $25 \mu\text{m}$ nach dem kambialen Alter akkumuliert, spiegeln die lebensjährlichen Mittelwerte den Verlauf in radialer Richtung wider. In jungen Lebensjahren liegen die mittleren Tracheidendurchmesser unter dem globalen Mittelwert, wobei die radialen Werte schneller als die tangentialen Werte ansteigen (MITCHELL & DENNE 1997). Wie in Abbildung 30 gezeigt, nehmen die mittleren lebensjährlichen radialen und tangentialen Tracheidendurchmesser etwa ab dem 14. bzw. 18. Lebensjahr ein konstantes Niveau an und schwanken geringfügig um den globalen Mittelwert. Dies ist früher als durch die Merkmale zur Identifizierung juvenilen und adulten Holzes bestimmten Eintritte in die adulte Phase, was darauf hindeutet, dass juveniles Holz zwar kleinere Tracheidendurchmesser als adultes Holz zeigt, jedoch kein kausaler Zusammenhang mit den Eigenschaften juvenilen Holzes besteht. Geprüft auf Unterschiede zwischen den Standorten, weisen die Tracheiden der Bäume aus Ehingen signifikant bis dezisiv größere tangentiale Tracheidendurchmesser auf, als Bäume von anderen Standorten; dies gilt mit Ausnahme des Vergleichs Ehingen mit Lörrach auch für die radialen Tracheidendurchmesser. Eine Erklärung hierfür könnte in der Begründung des Standortes mit Handelspflanzen liegen. Nicht erklärbar sind die Unterschiede der Tracheidendurchmesser zwischen den verschiedenen Wuchsmodellen. So unterscheiden sich alle Wuchsmodelle auf verschiedenen Signifikanzniveaus voneinander – außer der beiden Kombinationen ‚langsam-schnell‘ mit ‚schnell-langsam‘ und ‚langsam‘ mit ‚schnell‘. Da insbesondere die am stärksten kontrastierenden Modelle ‚schnell‘ und ‚langsam‘ keinen signifikanten Unterschied zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass die festgestellten Unterschiede zufälliger Natur sind und aus den Ergebnissen keine plausible Tendenz hinsichtlich des Einflusses der Wuchsmodelle abzuleiten ist. Lebensjahre minimaler tangentialer Tracheidendurchmesser fallen mit dem Anstieg der Jahringbreiten und einer hohen Teilungsaktivität des Kambiums zusammen. Daher beschränkt sich das Ausdifferenzieren der Tracheiden auf die radiale Dimension (BAILEY 1920).

Abbildung 30 Mittlere radiale Tracheidendurchmesser und Standardabweichung (blau) [μm], mittlere tangentielle Tracheidendurchmesser und Standardabweichung (rot) [μm] im kambialen Alter und globale Mittelwerte bei Ortsauflösung 25 μm (gestrichelt, Farben entsprechend).



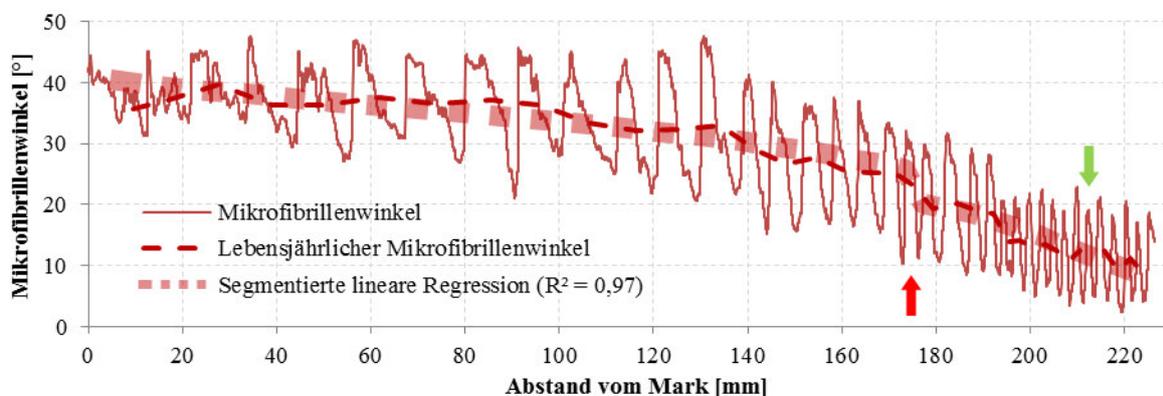
Die Tracheidendurchmesser – gemittelt aus radialer und tangentialer Dimension – decken sich mit den von GÖHRE (1958) an nordostdeutschen Douglasien gemessenen Werten. Verglichen mit aus Wanddicke und Lumendurchmesser nachvollzogenen Werten für amerikanische Anbauten fallen die Dimensionen des untersuchten Materials geringfügig kleiner aus (WAGENFÜHR & SCHEIBER 1985). Andere Mittelwerte amerikanischer Douglasie gleichen den im Frühholz gemessenen, relativ großen radialen und tangentialen Tracheidendurchmessern (PANSIN & DE ZEEUW 1980). Untersuchungen zu anatomischen Ursachen der variierenden Tränkbarkeit nordamerikanischer Douglasie zeigen, dass eine bessere Tränkbarkeit bei größeren radialen und tangentialen Tracheidendurchmessern von 40 μm bzw. 36 μm auftritt (KRAHMER 1961). Gegenüber Durchmessern von 28 μm bzw. 27 μm in schwer tränkbarem Holz nimmt das untersuchte Holz somit eine intermediäre Stellung ein.

4.1.6 Mikrofibrillenwinkel

Der Mikrofibrillenwinkel der untersuchten Bäume variiert wie die Tracheidenlänge einerseits innerhalb der Jahrringe, andererseits im Verlauf der betrachteten Altersspanne. Mit einem Variationskoeffizienten von 50 % streuen die Werte daher stark, so dass der aus einer radialen Auflösung von 25 μm resultierende mittlere Mikrofibrillenwinkel $21 \pm 11^\circ$ beträgt. Das globale Maximum von 101° findet sich inmitten eines Jahrringes aus dem 9. Lebensjahr, während das globale Minimum von $0,8^\circ$ im Spätholz eines Jahrringes aus dem 42. Lebensjahr liegt. Die Mittelwerte im Mark bzw. mittleren kambialen Alter von 42 Jahren betragen 40° bzw. 12° und sind damit größer als die von ERICKSON & ARIMA (1974) gemessenen Werte von 32° im ersten Jahrring, und 7° im kambialen Alter von 30 Jahren. Abbildung 31 zeigt repräsentativ den intraanuellen radialen Verlauf mit den folgenden Charakteristika: ein initial sprunghafter Anstieg des Mikrofibrillenwinkels in den

ersten Zellen des Frühholzes, der insbesondere an der verschieden weit fortgeschrittenen Holzbildung im Fällungsjahr 2012 zu erkennen ist, gefolgt vom maximalen Wert im Frühholz, wonach der Winkel sukzessiv zum Minimum im Spätholz abklingt und in den letzten Zellen des Spätholzes bereits wieder ansteigt (EVANS 2009, LICHTENEGGER et al. 1999). Rechnerisch sind keine das Früh- und Spätholz charakterisierenden Werte zu ermitteln – einerseits aufgrund der Abnahme der Mikrofibrillenwinkel vom juvenilen zum adulten Holz, andererseits wegen Niveauunterschieden des mittleren adulten Mikrofibrillenwinkels der einzelnen Bäume zueinander. Allgemein hat beschleunigtes Wachstum eine Vergrößerung des Mikrofibrillenwinkels um 2 bis 3 ° für einige Jahre zur Folge (ERICKSON & ARIMA 1974) – nur bei einem Baum treten nach einem Eingriff geringfügig größere Mikrofibrillenwinkel auf. Beispielsweise ist für den nach dem Wachstumsmodell ‚schnell-langsam‘ gewachsenen Baum 66 aus Kandern, dessen radialer Verlauf des Mikrofibrillenwinkels in Abbildung 31 dargestellt ist, zwei Jahre nach dem Eintritt in die adulte Phase eine Durchforstung dokumentiert. Dennoch variieren die Mikrofibrillenwinkel in den folgenden Jahren konstant um einen lebensjährlichen Mittelwert von 11 °. Da Daten von Eingriffen für die gesamten Standorte gelten, ist es allerdings möglich, dass einige der Bäume durch die Maßnahmen nicht betroffen sind und deshalb keine Änderungen der Wuchsbedingungen erfahren haben. Werden nicht punktuelle Eingriffe, sondern Wachstumsmodelle betrachtet, so liegt der mittlere lebensjährliche Mikrofibrillenwinkel schnell gewachsener Bäume ab dem 23. Lebensjahr bei $17 \pm 0,8$ °. Im Vergleich dazu beträgt der korrespondierende mittlere Winkel langsam gewachsenen Holzes $12 \pm 0,6$ °, während die Standardabweichung des Mittelwertes der anderen drei Wachstumsmodelle mit $15 \pm 1,5$ ° in diesem Bereich von den extremen Wachstumsmodellen umhüllt wird.

Abbildung 31 Mikrofibrillenwinkel [°], lebensjährlicher Mikrofibrillenwinkel (schmal gestrichelt) [°] und segmentierte lineare Regression (breit gestrichelt, $R^2 = 0,97$) [°] mit Abstand vom Mark [mm] von Baum 66 aus Löwenstein. Anhand des Merkmals Mikrofibrillenwinkel identifizierter Eintritt in die adulte Phase im 25. Lebensjahr (roter Pfeil). Erste Durchforstung (grüner Pfeil).



Unter Anwendung der segmentierter lineare Regression wird das anhand des Mikrofibrillenwinkels bestimmte mittlere Eintrittsalter in die adulte Phase im $23. \pm 4$ Lebensjahr identifiziert, was deutlich später ist, als für englische Douglasie im kambialen Alter von 16 festgestellt (BAWCOMBE 2012). Tabelle 18 zeigt gemittelte Eigenschaften juvenilen und adulten Holzes sowie der Kern- bzw. Splintholz-Teilkollektive. Die Mikrofibrillenwinkel der Teilkollektive adulten Holzes unterscheiden sich konklusiv voneinander und zum adulten Holz, was auch für den Unterschied von im Mittel 12° zwischen dem juvenilen und adulten Holz gilt. Fast das gesamte, im Mittel 53 % der Radiusbreite einnehmende juvenile Holz ist verkernt; liegt der Eintritt eines Baumes in die adulte Phase im Splintholz, existiert juveniles Splintholz. Das adulte Splintholz nimmt mit im Mittel 27 % der Radiusbreite einen größeren Anteil des adulten Holzes ein.

Tabelle 18 Eigenschaften anhand des Merkmals Mikrofibrillenwinkel identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.

Segmentierte lineare Regression Mikrofibrillenwinkel		Juveniles Kernholz	Juveniles Splintholz	Juveniles Holz	Adultes Kernholz	Adultes Splintholz	Adultes Holz
Mittlere Jahrringanzahl	[-]	16 ± 4	2 ± 1	16 ± 4	9 ± 4	13 ± 2	20 ± 4
Mittleres höchstes kambiales Alter	[kA]	22 ± 4	29 ± 1	22 ± 4	30 ± 2	42 ± 1	42 ± 1
Mittlerer Anteil an der Radiusbreite	[%]	52	0	53	20	27	47
Mittlerer Mikrofibrillenwinkel	[°]	27 ± 9	12 ± 8	27 ± 9	16 ± 8	14 ± 8	15 ± 8

Aufgrund der kontrastierenden und sich teilweise überschneidenden Wuchsbedingungen, die den Übergang von der juvenilen zur adulten Phase beeinflussen, kann ein Zusammenhang des Anteils juvenilen Holzes nur zum Standraum der Bäume hergestellt werden: Bei Standräumen von 20 m^2 , 10 m^2 , 5 m^2 , und $2,5 \text{ m}^2$ betragen die mittleren Anteile juvenilen Holzes an der Radiusbreite 65 %, 61 %, 44 % bzw. 40 %. In Anbetracht der linearen Korrelation (ERICKSON & ARIMA 1974) von – obgleich in den tangentialen Messpunkten auf den Stammscheiben geringfügig variierender – Tracheidenlänge und Mikrofibrillenwinkel mit einem Bestimmtheitsmaß von 81 % und der Abhängigkeit der Tracheidenlänge vom Standraum (KARLSSON et al. 2013), erscheint ein Zusammenhang gegeben. Allerdings ist eine statistische Absicherung der Tendenz aufgrund eines zu geringen Stichprobenumfangs nicht möglich. Mikrofibrillenwinkeln und Jahrringbreiten korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 18 % – dies spricht gegen die Abgrenzung juvenilen und adulten Holzes anhand von Jahrringbreiten (PAUL 1960).

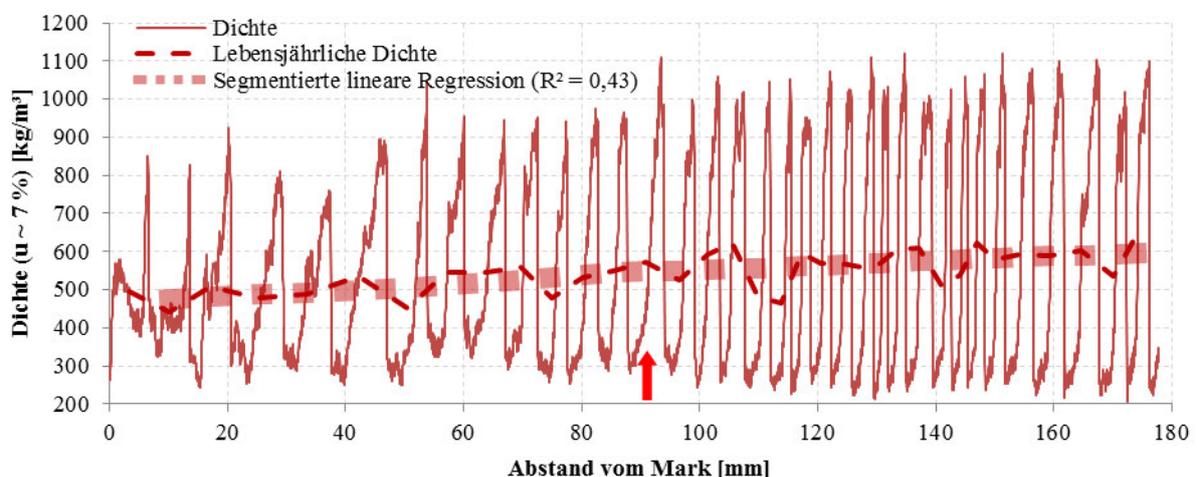
4.2 Ausgewählte physikalische und mechanische Eigenschaften

Abgeleitet aus den anatomischen Eigenschaften werden die physikalischen Eigenschaften Rohdichte und Quellungsverhalten, sowie die verwendungsrelevanten mechanischen Eigenschaften Druck- und Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchschlagarbeit dargestellt und diskutiert.

4.2.1 Rohdichte

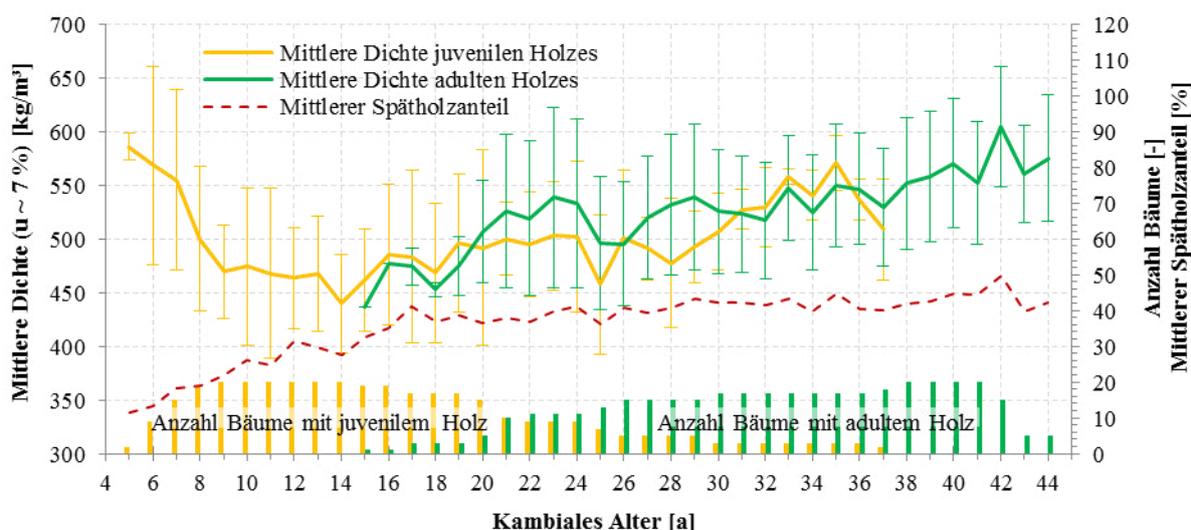
Analog zu histometrischen Eigenschaften variiert die Rohdichte sowohl innerhalb des Jahrringes, als auch mit dem kambialen Alter (RATHGEBER et al. 2006). Bei einer Holzfeuchte um 7 % und Ortsauflösung 25 μm stellen radialen Profile wie in Abbildung 32 gezeigt die charakteristischen Rohdichtekontraste dar: die Frühholzzonen zeigen in den ersten fünf Jahrringen Werte von etwa 400 kg/m^3 , danach sinken die Werte auf relativ konstante 215 kg/m^3 . Die Rohdichte der Spätholzzonen steigt von circa 800 kg/m^3 nahe dem Mark bis teilweise über 1000 kg/m^3 und vereinzelt 1200 kg/m^3 (HAPLA 1981). Damit bestimmt die Spätholzdichte die Rohdichte eines Jahrringes. Während der globale Mittelwert der Frühholzzonen von 311 kg/m^3 gut mit dem an 50-jähriger polnischer bzw. nordostdeutscher Douglasie gemessenen Wert übereinstimmt, ist die mittlere Rohdichte der Spätholzzonen von 911 kg/m^3 deutlich höher als entsprechende Spätholzmittelwerte (RACZKOWSKI 1963). Das Verhältnis der annualen Rohdichteextrema des untersuchten Holzes von 1 : 3 ist demnach ausgeprägter als schwächer variierende ganzheitlich berechnete Relationen (RACZKOWSKI 1963, GÖHRE 1958). Am besten repräsentiert Baum 148 aus Löwenstein den intra- und interannualen Verlauf der Rohdichte: Abbildung 32 zeigt den Graph bei Ortsauflösung 25 μm , die lebensjährlichen Mittelwerte und den daraus berechneten Trend, wonach die Rohdichte lebensjährlich um 0,72 kg/m^3 zunimmt.

Abbildung 32 Rohdichte [kg/m^3], lebensjährliche Rohdichte (schmal gestrichelt) [kg/m^3] und segmentierte lineare Regression (breit gestrichelt, $R^2 = 0,43$) [kg/m^3] bei Holzfeuchte um 7 % mit Abstand vom Mark [mm] von Baum 184 aus Löwenstein. Anhand des Merkmals Rohdichte identifizierter Eintritt in die adulte Phase im 21. Lebensjahr (Pfeil).



Wie in Abbildung 33 dargestellt, bestimmt das lokale Maximum der Frühholzrohddichte die Rohddichte der ersten Jahrringe; danach nimmt die mittlere lebensjährlichen Rohddichte bis zum 10. Lebensjahr ab, um anschließend sukzessiv anzusteigen. Dieses für Douglasie relativ häufig beschriebene Muster (BAWCOMBE 2012, GARTNER et al. 2002, FABRIS 2000, ABDEL-GADIR & KRAHMER 1993a, DI LUCCA 1989) wird auch als *check pattern* bezeichnet (PETERSON et al. 2007). Das *check pattern* ergibt sich aus dem Anstieg der mittleren lebensjährlichen Frühholz- und damit Jahrringbreite in den entsprechenden Lebensjahren (Abbildung 16). Dem eher seltenen *check pattern* folgt beispielsweise auch *Tsuga heterophylla* – bei anderen Koniferenarten nimmt die Rohddichte vom Mark zum Kambium ab oder zeigt kein lokales Minimum in Marknähe (JOZSA & MIDDLETON 1994, PANSHIN & DE ZEEUW 1980). Während der Verlauf der mittleren lebensjährlichen radialen Tracheidendurchmesser ebenfalls dem *check pattern* folgt, steigt der mittlere Spätholzanteil in den ersten Lebensjahren an und folgt entgegen einiger früherer Untersuchungen nicht dem *check pattern* (GARTNER et al. 2002, ABDEL-GADIR & KRAHMER 1993a). Das Minimum der mittleren lebensjährlichen Rohddichte liegt im 14. Lebensjahr. Wird die Rohddichte aller 730 untersuchten Jahrringe mit dem Spätholzanteil korreliert, ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 21 %. Werden allerdings zur Korrelation die Werte vor dem 14. Lebensjahr der Bäume ausgeschlossen, beträgt das Bestimmtheitsmaß 38 %. Diese ermittelten Bestimmtheitsmaße stimmen mit frühere Untersuchungen von MCKIMMY (1966) und GÖHRE (1958) überein.

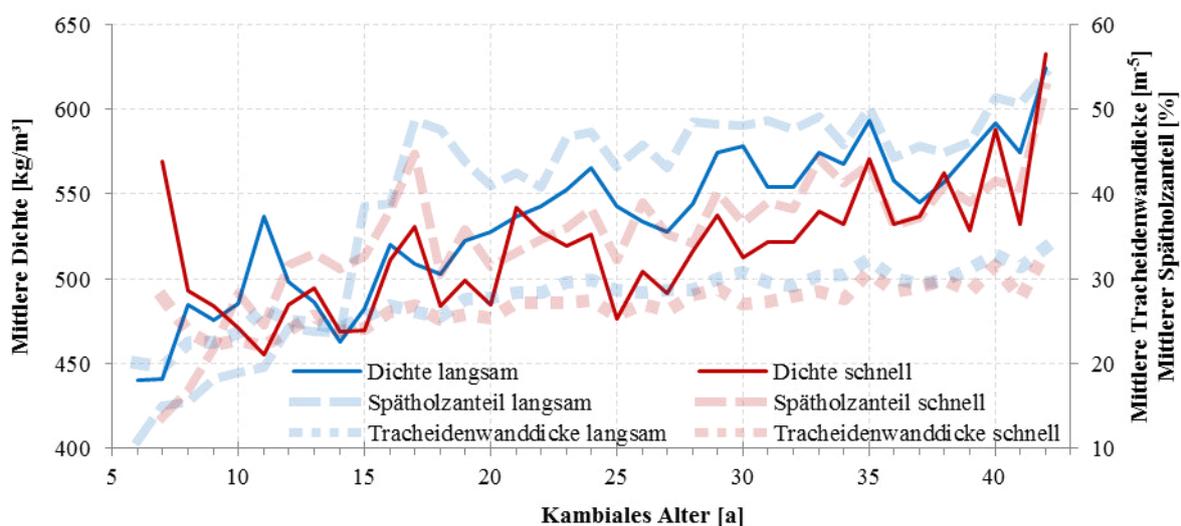
Abbildung 33 Mittlere Rohddichte und Standardabweichung des juvenilen Holzes (gelb) [kg/m^3 , $u \sim 7\%$], mittlere Rohddichte und Standardabweichung des adulten Holzes (grün) [kg/m^3 , $u \sim 7\%$], mittlerer Spätholzanteil (rot) [%] und Anzahl der Jahrringe von juveniler und adulter Rohddichte (Balken, Farben entsprechend, $n_{L15} = 2$, $n_{L16} = 9$, $n_{L17} = 15$, $n_{L18} = 19$, $n_{L142} = 15$, $n_{L43-44} = 5$) mit kambialem Alter [a].



Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation von Rohddichte und Jahrringbreite beträgt 22 %. Die Ursache eines derart schwachen Zusammenhanges liegt in der Variabilität der Rohddichte gleich breiter

Jahrringe, die sich aus dem altersabhängigen Gradienten der Rohdichte und des Spätholzes ergibt (MEGRAW 1986, LITTLEFORD 1961, RENDELE 1959). Hingegen liefert die Korrelation der mittleren lebensjährlichen Rohdichten und Jahrringbreiten durch den Zusammenhang zwischen dem *check pattern* und dem schnellen Jugendwachstum ein Bestimmtheitsmaß von 78 %. Dasselbe Bestimmtheitsmaß zeigt die Korrelation von Rohdichte und Jahrringbreiten, wenn die Jahrringbreiten mit Intervallen von 1 mm klassifiziert werden. Es besteht somit ein altersunabhängiger Trend zu dichten und gleichzeitig feinen Jahrringen. Abstrahiert ausgedrückt nimmt die mittlere Rohdichte der Klassen um 2 % ab, wenn die Jahrringbreite um 1 mm zunimmt. Bei Ortsauflösung 25 μm betragen Bestimmtheitsmaße von Korrelationen lokaler Rohdichte mit dem tangentialen Tracheidendurchmesser 38 %, mit dem radialen Tracheidendurchmesser 73 % und mit der Tracheidenwanddicke 94 %. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Tracheidenwanddicke aus der lokalen Rohdichte und den Tracheidendurchmessern berechnet wird. Ein maximaler Korrelationskoeffizient von 99 % gilt für den Zusammenhang zwischen Wanddicke und Rohdichte langsam gewachsener Bäume, da langsames Wachstum exogene Faktoren wie Konkurrenz maximiert und die Tracheiden eher abrupte Dimensionsänderungen vom Früh- zum Spätholz zeigen (RENDELE 1960). Wie Abbildung 34 zeigt, ist die mittlere Rohdichte der Jahrringe dieser Bäume meist deutlich höher als bei schnell gewachsenen Bäumen, was auf entsprechende Wanddicken und Spätholzanteile zurückzuführen ist. In Analogie zur Tracheidenwanddicke besteht kein signifikanter Rohdichteunterschied zwischen den Standorten.

Abbildung 34 Mittlere Rohdichte [kg/m^3], mittlerer Spätholzanteil (lang gestrichelt) [%] und mittlere Tracheidenwanddicke (kurz gestrichelt) [m^{-5}] der Wuchsmodelle langsam (blau) und schnell (rot) mit kambialem Alter [a].



Wie in Tabelle 19 dargestellt, identifiziert die segmentierte lineare Regression den mittleren Eintritt in die adulte Phase im 25. Lebensjahr mit einer Standardabweichung von sieben Lebensjahren. Dieses kambiales Alter stimmt gut mit Untersuchungen an nordamerikanischer Küstendouglasie überein (ABDEL-GADIR & KRAHMER 1993b). Andere Untersuchungen nennen ein Eintrittsalter in die adulte

Phase bereits im 19. (BAWCOMBE 2012) oder 22. Lebensjahr (DI LUCCA 1987) – bei einigen der untersuchten Bäume beginnt die adulte Phase bereits im 15. Lebensjahr (Abbildung 33). Zwischen der bei Ortsauflösung 25 μm berechneten mittleren Rohdichte juvenilen und adulten Holzes besteht ein konklusiver Unterschied von 470 kg/m^3 bzw. 526 kg/m^3 . Diese Mittelwerte stimmen sehr gut mit Werten etwa 20 Jahre älterer, wallonischer Douglasie überein (POLLET et al. 2013). Relativ beträgt die Rohdichte des juvenilen Holzes damit 89 % der Rohdichte adulten Holzes, was dem Verhältnis nordamerikanischer markenthaltender und markfreier Kanthölzer von 87 % nahe kommt (GERHARDS 1979). Dieselbe Relation ist dokumentiert für den Unterschied zwischen juvenilem und adultem Holz aus Nordamerika, wobei die absoluten Werte mit 491 kg/m^3 bzw. 563 kg/m^3 höher sind (DI LUCCA 1987). Verglichen mit der Rohdichte amerikanischer Küstendouglasie im kambialen Alter 3 bis 11 von 378 bis 481 kg/m^3 sind die mittleren lebensjährlichen Rohdichten der untersuchten Bäume in dieser Altersspanne höher (STOEHR et al. 2009). Auch die Vergleiche zwischen juvenilem und adultem Kernholz, sowie zwischen adultem Kernholz und adultem Splintholz zeigen den Alterstrend durch jeweils konklusive Unterschiede. Mittlere Anteile der Teilkollektive an der Radiusbreite ähneln anhand des Merkmals Mikrofibrillenwinkel bestimmten Anteilen – innerhalb der einzelnen Bäume variieren die anhand dieser Merkmale identifizierten Anteile häufig.

Tabelle 19 Eigenschaften anhand des Merkmals Rohdichte identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.

Segmentierte lineare Regression Rohdichte		Juveniles Kernholz	Juveniles Splintholz	Juveniles Holz	Adultes Kernholz	Adultes Splintholz	Adultes Holz
Mittlere Jahrringanzahl	[-]	17 \pm 5	5 \pm 3	18 \pm 7	10 \pm 4	12 \pm 3	19 \pm 7
Mittleres höchstes kambiales Alter	[kA]	22 \pm 5	33 \pm 5	24 \pm 7	30 \pm 2	42 \pm 1	42 \pm 1
Mittlerer Anteil an der Radiusbreite	[%]	51	0	51	22	27	49
Mittlere Rohdichte (u-7 %)	[kg/m^3]	470 \pm 203	568 \pm 314	470 \pm 203	505 \pm 259	543 \pm 282	526 \pm 272

Werden Jahrringbreiten und Spätholzanteile anhand der Identifizierungsmerkmale Rohdichte oder Spätholzanteil nach juvenilem und adultem Holz unterschieden, ergeben sich andere Bestimmtheitsmaße von Korrelationen dieser Eigenschaften mit der Rohdichte. Der Zusammenhang von Jahrringbreite und Rohdichte ist im juvenilen Holz nach beiden Identifizierungen ähnlich dem globalen Bestimmtheitsmaß. Niedrigere Bestimmtheitsmaße für Korrelationen adulten Holzes bedeuten, dass die mittlere Rohdichte eines Jahrringes im adulten Holz relativ unabhängig ist von der Jahrringbreite. Hingegen wächst der Einfluss des Spätholzanteils auf die Rohdichte, da die Spätholzanteile in der adulten Phase relativ konstant sind. So beträgt das Bestimmtheitsmaß der Korrelation von Rohdichte und Spätholzanteil 35 % nach der Identifizierung anhand des Spätholzanteils bzw. 36 % anhand der Rohdichte.

4.2.2 Druckfestigkeit und Druck-Elastizitätsmodul parallel zur Faser

Die Auswertungen der Druckversuche (Festigkeiten und Bruchverhalten) zeigen, dass die parallel zur Faserrichtung belasteten Prüfkörper makroskopisch kaum erkennbare Stauchbrüche aufweisen. Die bei einer Holzfeuchte von 13 % gemessenen Mittelwerte betragen für die Druckfestigkeit $43 \pm 8,5 \text{ N/mm}^2$ und $12456 \pm 3442 \text{ N/mm}^2$ für den Druck-Elastizitätsmodul. Diese Kennwerte sind niedriger als für nordamerikanische Douglasien und bisher für europäische Douglasien dokumentierte Werte von 43 bis 68 N/mm^2 , wobei die europäischen Douglasien tendenziell etwas niedrigere Werte aufweisen (FOREST PRODUCTS LABORATORY 1999, MÖHLER & BEYERSDORFER 1987, HAPLA 1986, WAGENFÜHR & SCHEIBER 1985, PECHMANN & COURTOIS 1970, KNIGGE 1958, GÖHRE 1958). Mit Werten von 30 bis 40 N/mm^2 für etwa gleichaltes Douglasienholz aus England ist eine gute Übereinstimmung gegeben (BAWCOMBE 2012).

Um zu entscheiden, ob die geprüften äußeren Kernholzbereiche dem juvenilen oder adulten Kernholz zuzuordnen sind, werden die Identifizierungen des Eintritts in die adulte Phase auf das getestete Holz übertragen. Die zur Identifizierung verwendeten Merkmale Mikrofibrillenwinkel, Spätholzanteil, Tracheidenwanddicke und Rohdichte haben einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, deshalb werden alle diese Merkmale einbezogen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass identifizierte Eintritte in die adulte Phase für Radian aus Brusthöhe gelten, während die Prüfkörper die Stammhöhen von 1,3 bis 3,3 m repräsentieren. Da juveniles Holz innerhalb des Stammes eine zylindrische Ausdehnung zeigt, ändern sich Holzeigenschaften eines Jahrringes mit der Höhe im Stamm.

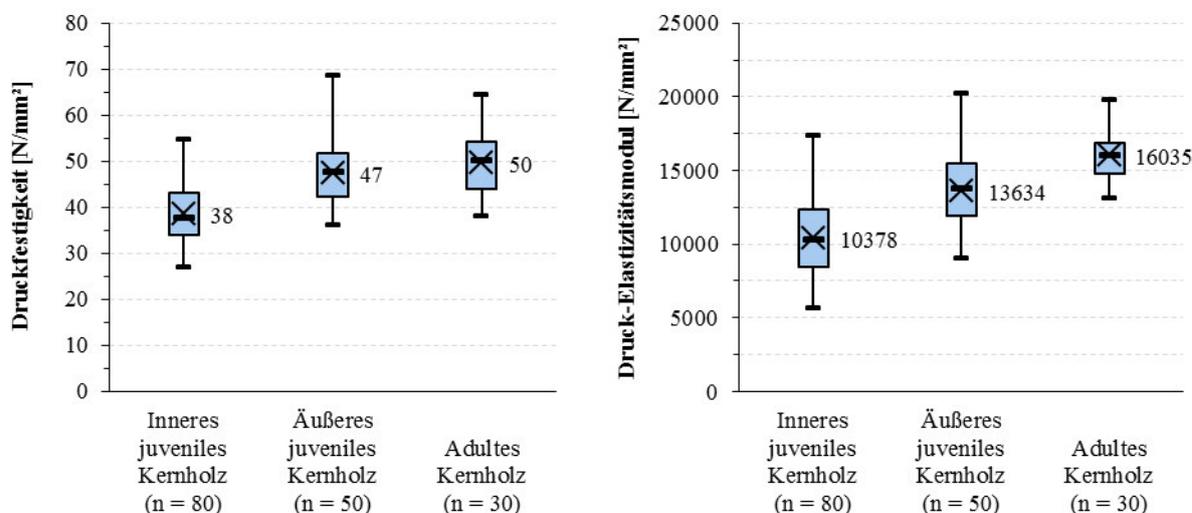
Tabelle 20 Rechnerische Zuordnung geprüfter äußerer Kernholzbereiche zum juvenilen bzw. adulten Kernholz.

Identifizierung anhand Merkmal:		Mikrofibrillenwinkel		Spätholzanteil		Tracheidenwanddicke		Dichte		juvenil oder adult	
Standort	Baum	Abholzigkeit (AHK) über 2 m [mm/m]	Breite adultes Kernholz [mm]	- (20 mm + AHK)	Breite adultes Kernholz [mm]	- (20 mm + AHK)	Breite adultes Kernholz [mm]	- (20 mm + AHK)	Breite adultes Kernholz [mm]		- (20 mm + AHK)
Lörrach	103	14	32	-2	26	-7	57	24	39	5	juvenil
	78	12	42	9	55	22	55	22	64	31	adult
Kandern	19	17	7	-29	11	-26	9	-28	11	-26	juvenil
	222	12	105	73	132	100	132	100	74	42	adult
Ehingen	94	29	-4	-53	-12	-61	78	30	20	-29	juvenil
	203	18	30	-8	5	-34	30	-8	49	11	juvenil
Löwenstein	66	33	14	-39	14	-39	5	-48	18	-35	juvenil
	400	26	51	5	60	14	79	33	75	29	adult

Das adulte Kernholz in Brusthöhe muss daher eine radial deutlich größere Ausdehnung als die Summe aus den festgelegten 20 mm radialer Prüfkörperdimension zuzüglich der Abholzigkeit der Bäume zeigen, damit auch das Holz der nächsthöheren zwei Meter als adult definiert werden darf. Tabelle 20

zeigt die rechnerische Zuordnung der geprüften äußeren Kernholzbereiche zum juvenilen und adulten Kernholz. Es ergibt sich, dass nur das geprüfte Kernholz der Bäume Lörrach 78, Kandern 222 und Löwenstein 400 adultes Kernholz zeigt. Das äußere Kernholz der anderen Bäume muss anhand der Prüfung als äußeres juveniles Kernholz betrachtet werden und wird zur Abgrenzung vom inneren juvenilen Kernholz als eigenes Kollektiv definiert. Die inneren Kernholzbereiche aller acht geprüften Bäume bilden das Kollektiv inneres juveniles Kernholz. Gemäß der Probennahme erstreckt sich dieses Kollektiv vom fünften Jahrring vom Mark um die radiale Prüfkörperdimension in Richtung des Kambiums. Dem fünften Jahrring entspricht die Spanne der Lebensjahre 9-12, das Ende dieses Bereiches liegt im maximal 14. Lebensjahr. Vom äußersten Kernholzjahrring markwärts ist das äußere Kernholz definiert, wovon fünf Bereiche als äußeres juveniles, und drei Bereiche als adultes Kernholz identifiziert sind. Das äußere juvenile Kernholz reicht vom maximal 31. Lebensjahr bis zum 20. Lebensjahr in Richtung des Markes. Die adulten Kernholzbereiche beginnen maximal im kambialen Alter 33 und reichen markwärts bis in den kambiales Alter 25 repräsentierenden Jahrring. Abbildung 35 stellt die in der Druckprüfung bestimmten Eigenschaften der Kollektive dar. Dabei zeigt das adulte Kernholz mit $50 \pm 7 \text{ N/mm}^2$ eine konklusiv höhere mittlere Druckfestigkeit als das innere juvenile Kernholz, dessen mittlere Druckfestigkeit $38 \pm 7 \text{ N/mm}^2$ beträgt. Auch der mittlere Druck-Elastizitätsmodul des adulten Kernholzes von $16035 \pm 1805 \text{ N/mm}^2$ ist konklusiv höher als der Mittelwert des inneren juvenilen Kernholzes mit $10378 \pm 2873 \text{ N/mm}^2$. Für das äußere juvenile Kernholz bestimmte Mittelwerte ähneln aufgrund der radialen Nähe bereits den Eigenschaften adulten Kernholzes. Während die Druckfestigkeit im äußeren juvenilen Kernholz mit $47 \pm 8 \text{ N/mm}^2$ konklusiv höher als im inneren juvenilen Kernholz ist, besteht kein signifikanter Unterschied zum adulten Kernholz. Hingegen unterscheidet sich der Druck-Elastizitätsmodul des äußeren juvenilen Kernholzes mit $14 \pm 2,7 \text{ kN/mm}^2$ konklusiv von den beiden anderen Kollektiven. Die Variationskoeffizienten der Druckfestigkeit und des Druck-Elastizitätsmoduls nehmen vom juvenilen zum adulten Holz um 4 bzw. 10 Prozentpunkte ab. Der Grund hierfür liegt im Zusammenhang zwischen den Druckeigenschaften und den ebenfalls eher konstanten anatomischen Eigenschaften adulten Holzes. Abbildung 36 zeigt die mittleren Druckfestigkeiten und Druck-Elastizitätsmoduln der einzelnen Kollektive im Spannungs-Verformungsdiagramm, wozu die Spannung auf $0,1 \text{ N/mm}^2$ und die Kompression auf $1 \mu\text{m}$ gerundet sind. Während die Elastizitätsmoduln deutlich zu erkennen sind, schwanken die Graphen im Bereich plastischer Verformung. Der Grund hierfür liegt in der Variation der Druckfestigkeit der Prüfkörper eines Teilkollektivs. Vergleiche zwischen den mittleren Druckfestigkeiten und Druck-Elastizitätsmoduln der einzelnen Bäume zeigen, dass die Werte des äußeren juvenilen bzw. adulten Kernholzes bei sieben Bäumen dezisiv höher sind als die Werte des inneren juvenilen Kernholzes. Nur bei einem Baum ist die Druckfestigkeit des adulten Kernholzes signifikant höher als im inneren juvenilen Kernholz, der Unterschied der Elastizitätsmoduln allerdings ist dezisiv. Damit nehmen Druckfestigkeit und Druck-Elastizitätsmodul mit dem kambialen Alter zu (BAWCOMBE 2012, LANGUM et al. 2009).

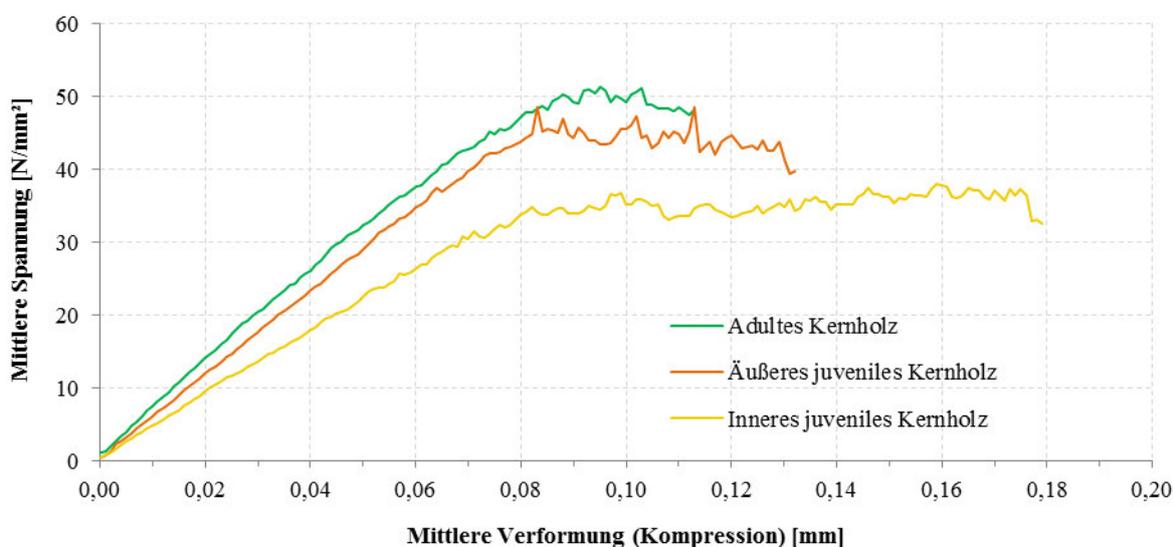
Abbildung 35 Druckfestigkeiten [N/mm²] und Druck-Elastizitätsmodul [N/mm²] von innerem juvenilem Kernholz (n = 80), äußerem juvenilem Kernholz (n = 50) und adultem Kernholz (n = 30).



Die Korrelation der Druckfestigkeit aller Prüfkörper mit dem Druck-Elastizitätsmodul liefert ein Bestimmtheitsmaß von 81 %. Analog dazu liegen die Bestimmtheitsmaße der Korrelation im inneren und äußeren juvenilen Kernholz bei 80 % bzw. 88 %. Das adulte Kernholz zeigt zwei Prüfkörper mit im Verhältnis zur Druckfestigkeit hohen Druck-Elastizitätsmoduln, die außerhalb der Standardabweichung der linearen Regressionsgeraden liegen. Daher ergibt sich in Kombination mit der geringen Prüfkörperanzahl für das adulte Kernholz ein Bestimmtheitsmaß der Korrelation von 30 %. Die in der Druckprüfung bestimmten Eigenschaften werden durch die Prüfkorpereigenschaften erklärt. So zeigen die Korrelationen von Druckfestigkeit und Druck-Elastizitätsmodul mit der Prüfkörperdichte bei einer mittleren Holzfeuchte von 13 % Bestimmtheitsmaße von 76 % bzw. 71 %. Geringfügig höher ist der für eine deutlich größere Prüfkörperanzahl bestimmte Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte nordostdeutschem Douglasienholzes (GÖHRE 1958). Werden Druckeigenschaften und Rohdichte auf Kollektivebene korreliert, betragen die Bestimmtheitsmaße 86 % bzw. 71 % für das innere juvenile Kernholz, 47 % bzw. 53 % für das äußere juvenile Kernholz und 57 % bzw. 25 % für das adulte Kernholz. Dieser Abfall der Bestimmtheitsmaße ist mit der abnehmenden Prüfkörperanzahl der Kollektive zu erklären, da sowohl die Rohdichte, als auch Druckfestigkeit und Druck-Elastizitätsmodul im adulten Kernholz die geringsten Variationskoeffizienten der Kollektive aufweisen. Schwächer ist der Zusammenhang zwischen der mittleren Breite vollständig in den Prüfkörpern enthaltener Jahrringe und den Druckfestigkeiten und Druck-Elastizitätsmoduln: hier liegen die Bestimmtheitsmaße bei 25 % bzw. 35 %. Die mittlere Jahrringbreite im inneren juvenilen Kernholz beträgt 7,5 mm – im Mittel enthalten die Prüfkörper nur zwei vollständige Jahrringe. Zwar sinken die mittleren Jahrringbreiten für das äußere juvenile und adulte Kernholz auf 5,5 mm bzw. 5,8 mm und die mittlere Anzahl steigt auf vier bzw. drei vollständige Jahrringe, doch das globale Bestimmtheitsmaß der Korrelation von Rohdichte und

Jahringbreite deutet darauf hin, dass die Jahringbreite kaum eine Prognose der mechanischen Eigenschaften des untersuchten Holzes zulässt.

Abbildung 36 Mittlere Spannung [N/mm²] und mittlere Verformung (Kompression) [mm] der Kollektive adultes Kernholz (grün, n = 30), äußeres juveniles Kernholz (rot, n = 50) und inneres juveniles Kernholz (gelb, n = 80). Rundungen: Spannung 0,1 N/mm², Verformung 1 μ m.



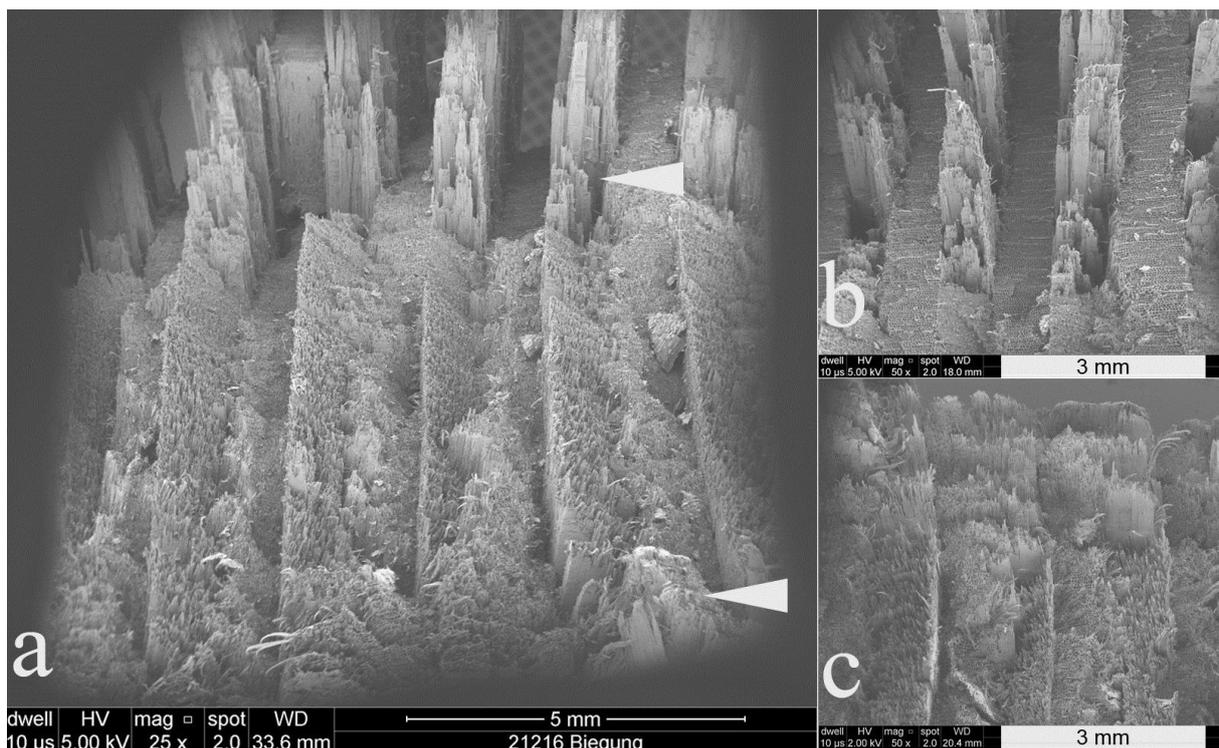
Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation der mittleren Prüfkörperdichten mit korrespondierenden Rohdichten aus radialen Profilen in Brusthöhe beträgt 63 %. Daraus folgt, dass andere in Brusthöhe gemessene Eigenschaften, wie Mikrofibrillenwinkel, Spätholzanteil und Tracheidenwanddicke orientierend mit der Druck-Festigkeit bzw. dem Druck-Elastizitätsmodul der geprüften Bereiche korreliert werden dürfen. Die Bestimmtheitsmaße betragen 35 % bzw. 39 % für den Mikrofibrillenwinkel, 49 % bzw. 41 % für den Spätholzanteil, 61 % für die Tracheidenwanddicke und 41 % bzw. 46 % für die gewichtete mittlere Tracheidenlänge. Diesen Zusammenhängen nach bewirken kleinere Mikrofibrillenwinkel, höhere Spätholzanteile, dickere Tracheidenwände und längere Tracheiden höhere Druckfestigkeiten und Druck-Elastizitätsmoduln. Alle diese Eigenschaften zeichnen adultes Holz gegenüber juvenilem Holz aus. Für die Teilkollektive inneres juveniles, äußeres juveniles bzw. adultes Kernholz nehmen Bestimmtheitsmaße der Rohdichte-Rohdichte-Korrelationen Werte von 32 %, 38 %, bzw. 70 % an; Korrelationen der anderen Eigenschaften lassen aufgrund der abnehmenden Prüfkörperanzahl keine sicheren zusätzlichen Aussagen zu.

4.2.3 Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul

Die Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls erfolgte an 96 Prüfkörpern. Die Auswertung ergibt eine globale mittlere Biegefestigkeit von 85 ± 17 N/mm² und einen Biege-Elastizitätsmodul von 10558 ± 2423 N/mm² bei 13 % Holzfeuchte. Abbildung 37 stellt eine

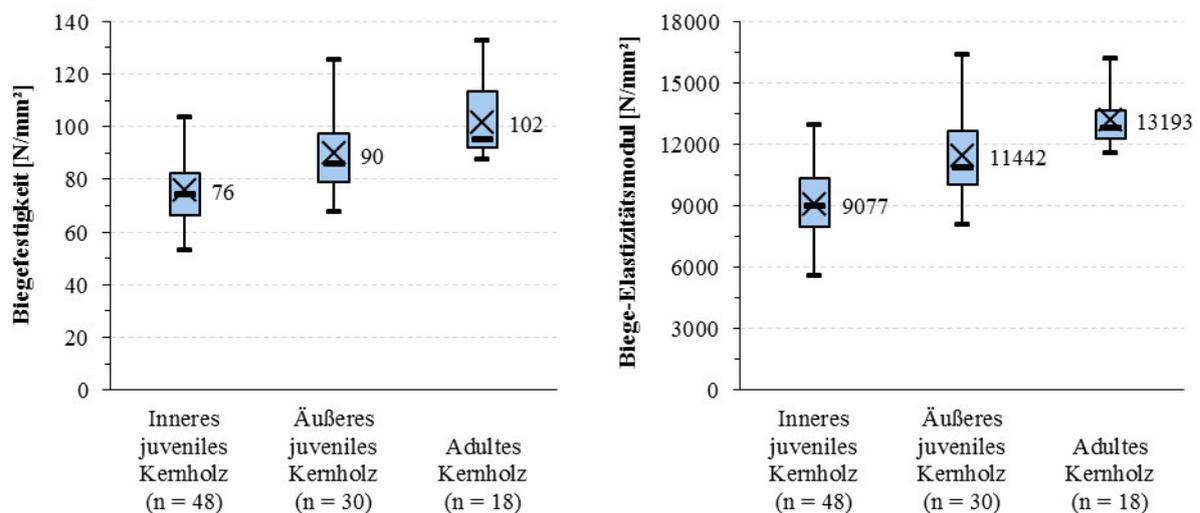
repräsentative Bruchfläche dar, mit den für Biegebrüche charakteristischen Druck- und Zugzonen. Die Zugzone ist charakterisiert durch einen scharfen Kontrast zwischen ausgerissenem Spätholzgewebe und uniform glatt abgerissenen Frühholzzonen. Innerhalb der gestauchten Druckzone sind lediglich die Jahrringgrenzen erkennbar. Der intraanuelle Übergang vom Früh- zum Spätholz ist nur durch die Dicke der Tracheidenwände zu erkennen (GÖHRE 1958). Dabei betragen bei Ortsauflösung 25 μm abgelesene Biege-Elastizitätsmoduln des Frühholzes 1 kN/mm^2 bis 2 kN/mm^2 , teilweise 2,5 kN/mm^2 . Die Biege-Elastizitätsmoduln des Spätholzes steigen gegenläufig zum Mikrofibrillenwinkel mit zunehmendem Abstand vom Mark von selten 5 kN/mm^2 über 10 kN/mm^2 , 15 kN/mm^2 , 20 kN/mm^2 , 25 kN/mm^2 bis zu 30 kN/mm^2 , teilweise 35 kN/mm^2 . Hinsichtlich der in DIN 52186 (1978) geforderten kantenparallelen Ausrichtung der Jahrringe in radialer und tangentialer Richtung finden sich im inneren Kernholzbereich einige Prüfkörper, die gemäß des Umfangs junger Bäume eine eher diagonale Jahrringlage aufweisen. Um den Unterschied zwischen innerem und äußerem Holz zu untersuchen, wird dies als charakteristisch für das Material angesehen. Untersuchungen an amerikanischer Douglasie zur Variation der Biegeeigenschaften zwischen eher tangentialer oder radialer Belastung dokumentieren einen Unterschied zwischen den Biegefestigkeiten, während die Jahrringausrichtung den Elastizitätsmodul nicht beeinflusst (GROTTA et al. 2005).

Abbildung 37 Charakteristische Bruchfläche eines Biegeprüfkörpers (Festigkeit 126 N/mm^2 , Elastizitätsmodul 16 kN/mm^2) aus dem äußeren juvenilen Kernholz. a) Querschnittsübersicht mit auf Zug (Pfeil oben) und Druck (Pfeil unten) belasteten Zonen, Messbalken entspricht 5 mm. b) Zugzonendetail mit glatt gebrochenem Frühholz und langfaserig hervorstehendem Spätholz, Messbalken 3 mm. c) Druckzonendetail mit weniger glatter Frühholzoberfläche und gestauchtem Spätholz, Messbalken 3 mm.



Aus der Korrelation der mittleren Biege- und Druckfestigkeiten resultiert ein Bestimmtheitsmaß von 91 %, da die geprüften Bereiche identisch sind und Druckeigenschaften die Biegeeigenschaften beeinflussen. Daher gilt die zur Auswertung der Druckprüfung berechnete Zuordnung der äußeren Kernholzbereiche zu den Kollektiven inneres bzw. äußeres juveniles und adultes Kernholz auch für die Biegeprüfung. Wie in Abbildung 38 gezeigt, nimmt die Biegefestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul mit dem kambialen Alter zu (POLLET et al. 2013, LANGUM et al. 2009, GÖHRE 1958). Die Mittelwerte der Biegefestigkeit betragen 76 ± 13 N/mm² im inneren juvenilen Kernholz, 90 ± 15 N/mm² im äußeren juvenilen Kernholz und 102 ± 14 N/mm² im adulten Kernholz. Dabei unterscheiden sich die beiden juvenilen Kollektive dezisiv voneinander. Im Gegensatz zur Druckfestigkeit besteht ein signifikanter Unterschied zwischen dem äußeren juvenilen Kernholz und angrenzendem adulten Kernholz, während der Unterschied zwischen innerem juvenilem Kernholz und adultem Kernholz konklusiv ist. Auf demselben Signifikanzniveau unterscheiden sich die Biege-Elastizitätsmodul letztgenannter Kollektive mit im Mittel $9 \pm 1,8$ kN/mm² bzw. $13 \pm 1,3$ kN/mm². Zwischen den Biege-Elastizitätsmoduln des juvenilen Kernholzes besteht ebenfalls ein konklusiver Unterschied. Zudem ist der mittlere Biege-Elastizitätsmodul im äußeren juvenilen Kernholz mit $11 \pm 2,1$ kN/mm dezisiv kleiner als im adulten Kernholz. Insbesondere die Biegeeigenschaften des äußeren juvenilen und adulten Kernholzes sind rechtsschief verteilt, was auch für das die beiden Kollektive zusammenfassende äußere Kernholz gilt.

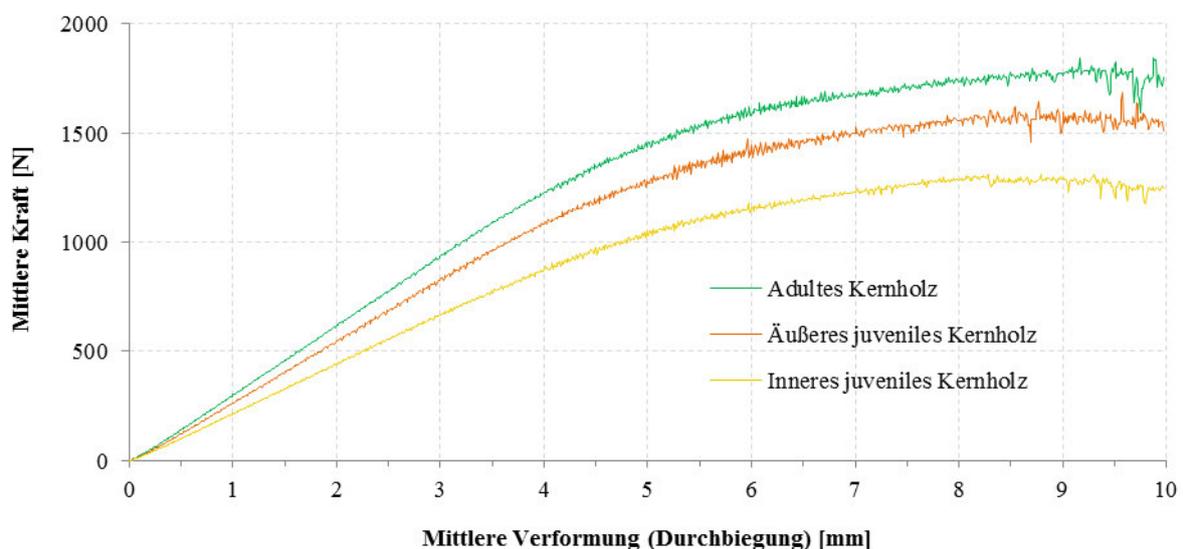
Abbildung 38 Biegefestigkeiten [N/mm²] und Biege-Elastizitätsmodul [N/mm²] von innerem juvenilem Kernholz (n = 48), äußerem juvenilem Kernholz (n = 30) und adultem Kernholz (n = 18).



Wie in Abbildung 39 dargestellt, unterscheiden sich die Biege-Elastizitätsmoduln der Teilkollektive im Kraft-Verformungsdiagramm, wobei die aufgenommene Kraft auf 10 N-Schritte, und die resultierende Verformung (Durchbiegung) auf 10 µm-Schritte gerundet sind. Die Variation der Prüfkörperquerschnittsflächen beträgt 0,7 %, weshalb anstelle von Biegespannungen in guter Näherung die von den Prüfkörpern aufgenommenen Maximalkräfte miteinander verglichen werden

können. Die mittlere Maximalkraft adulten Kernholzes ist mit 1830 ± 236 N konklusiv bzw. dezisiv höher als die Mittelwerte des inneren bzw. äußeren juvenilen Kernholzes von 1366 ± 234 N bzw. 1614 ± 275 N. Zwischen den juvenilen Teilkollektiven besteht dabei ein dezisiver Unterschied. Den Spitzenwert von 2364 N aufgenommener Kraft zeigt ein langfaserig gebrochener Prüfkörper des adulten Kernholzes, die ebenfalls höchste Biegefestigkeit dieses Prüfkörpers beträgt 132 N/mm². Die korrespondierende Rohdichte beträgt 648 kg/m³ bei 12,4 % Holzfeuchte und eine mittlere Jahrringbreite von 8,4 mm deutet an, dass die Jahrringbreite nur begrenzte Prognosestärke zu erwartender Biegefestigkeit bietet. Eine minimale aufgenommene Maximalkraft von 954 N zeigt ein kurzfasrig gebrochener Prüfkörper des inneren juvenilen Kernholzes, dessen Rohdichte 362 kg/m³ bei 12,3 % Holzfeuchte und dessen mittlere Jahrringbreite 7,6 mm betragen.

Abbildung 39 Mittlere Kraft [N] und mittlere Verformung [mm] der Kollektive adultes Kernholz (grün, n = 18), äußeres juveniles Kernholz (rot, n = 30) und inneres juveniles Kernholz (gelb, n = 48). Rundungen: Kraft 10 N, Durchbiegung 10 µm.



Da für die Bruchflächen aller Prüfkörper dokumentiert ist, ob die Spätholztracheiden eher kurz oder lang ausgerissen sind, bietet sich eine Gegenüberstellung mit den in der Biegeprüfung festgestellten Eigenschaften an. Im Vergleich zu 41 Prüfkörpern mit langfaserigen Brüchen zeigen 55 kurzfasrig gebrochene Prüfkörper eine dezisiv geringere mittlere Biegefestigkeit und Rohdichte sowie einen konklusiv niedrigeren mittleren Biege-Elastizitätsmodul. Im inneren Kernholz finden sich maximal zwei von sechs Prüfkörpern pro Baum, die langfaserig gebrochen sind. Das äußere Kernholz hingegen weist maximal zwei von sechs Prüfkörpern pro Baum auf, die kurzfasrig gebrochen sind. Innerhalb der Teilkollektive inneres juveniles, äußeres juveniles und adultes Kernholz betragen die Verhältnisse von kurz- zu langfaserig gebrochenen Prüfkörpern 1 : 0,2 bzw. 1 : 2 bzw. 1 : 4. Wird die Zunahme langfaseriger Brüche im Zusammenhang mit dem Alterstrend der Tracheidenlänge gesehen, zeigt dies indirekt den Einfluss der Tracheidenlänge des Spätholzes auf die Biegeeigenschaften (PANSHIN &

DE ZEEUW 1980, LEE & SMITH 1916). Das Bestimmtheitsmaß der Korrelation der mittleren Länge der Spätholztracheiden mit korrespondierenden Biegefestigkeiten und Biege-Elastizitätsmoduln beträgt 38 % bzw. 50 %. Neben der Tracheidenlänge ist die Rohdichte ein guter Indikator der zu erwartenden Biegeeigenschaften (LACHENBRUCH et al. 2010, SAUTER 1992, BARRETT & KELLOGG 1991). Nahe der Bruchstelle bestimmte Rohdichten der Prüfkörper korrelieren mit einem Bestimmtheitsmaß von 86 % mit der Biegefestigkeit und 82 % mit dem Biege-Elastizitätsmodul. Für die Teilkollektive ergeben sich Bestimmtheitsmaße von 71 % bis 86 %, die meist höher sind als Korrelationen der Rohdichte mit der Druckfestigkeit und dem Druck-Elastizitätsmodul. Während die Rohdichteprobe nächstmöglich der Biegebruchstelle gelegen ist, gibt die in der Druckprüfung bestimmte Rohdichte einen Wert des ganzen Prüfkörpers wieder. Unabhängig von der Probenanzahl der Kollektive ist die zur Biegeprüfung bestimmte Rohdichte damit präziser und besser geeignet zur Korrelation.

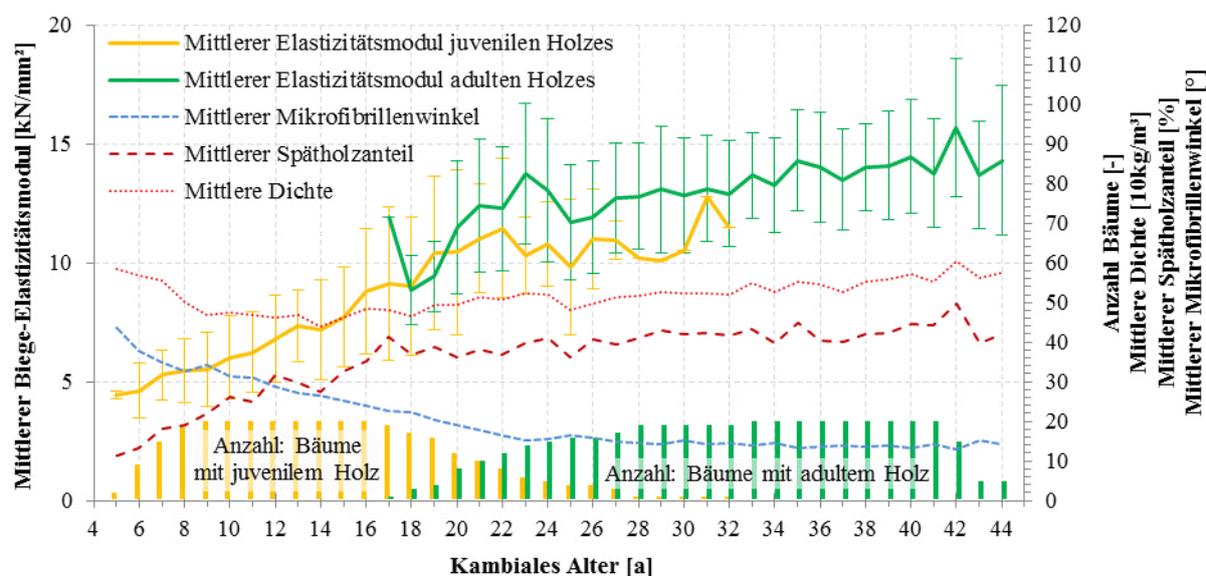
Die mittlere Jahrringbreite ist ein praxisnaher Zeiger zur visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 (2003), die angewendet werden darf, da die Querschnittsdimension den Vergleich von Sortimentsmittelwerten der Elastizitätsmoduln nicht beeinflusst (MÖHLER & BEYERSDORFER 1987). Aus Tabelle 21 geht hervor, dass sich die Prüfkörper relativ gleichmäßig auf die definierten Jahrringbreitenklassen S13 und S7/10 verteilen, während 26 % der Prüfkörper wegen einer mittleren Jahrringbreite größer als 8 mm ausscheiden. Wird zusätzlich nach den Teilkollektiven des juvenilen und adulten Holzes unterschieden, dominiert das innere juvenile Kernholz mit 19 Prüfkörpern die ausscheidende Klasse, während in Klasse S13 nur sechs Prüfkörper des inneren juvenilen Kernholzes eingestuft werden können. Zwischen den Elastizitätsmoduln und den mittleren Jahrringbreiten der jeweiligen Klassen bestehen jeweils mindestens signifikante Unterschiede. Ebenso sind die mittleren Biegefestigkeiten und Rohdichten der Klasse S13 signifikant höher als die Mittelwerte der Klasse S7/10. Dieselben Eigenschaften unterscheiden sich nicht signifikant zwischen der Klasse S7/10 und der ausscheidenden Klasse. Bei Transfer der Klassifizierung nach visueller Sortierung zur biegefestigkeitsbasierten Sortierung nach DIN 338 (2010) zeigt sich eine geringe Übereinstimmung von Sortier- und Biegefestigkeitsklasse. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen herzustellen, werden die Prüfkörper zusätzlich anhand des Grenzwertes 5 mm nach ihrer mittleren Jahrringbreite unterteilt. In guter Übereinstimmung ergeben sich um 11 % bzw. 19 % niedrigere Mittelwerte der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls für das Kollektiv größerer Jahrringbreite (POLLET et al. 2013, MÖHLER & BEYERSDORFER 1987). Mit einem Bestimmtheitsmaß von 14 % bzw. 26 % korrelieren Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul mit der mittleren Jahrringbreite der Prüfkörper. Dies bestätigt, dass die verallgemeinerte Jahrringbreite als Sortierkriterium insbesondere jungen und schnellgewachsenen Holzes nur begrenzt zur Prognose der Biegeeigenschaften beitragen kann (RENDELE 1959, LITTLEFORD 1961).

Tabelle 21 Eigenschaften nach DIN 4074-1 (2003), Kriterium mittlere Jahrringbreite sortierter fehlerfreier Prüfkörper.

Jahrringbreite (JRB) [mm]	Biegefestigkeit (5 %-Quantil) [N/mm ²]	Biege- Elastizitätsmodul (5 %-Quantil) [kN/mm ²]	Dichte [kg/m ³] bei u ~13 %	Mittlere Jahrringbreite (Prüfkörper) [mm]	Anzahl Prüfkörper [-]
JRB ≤ 6 mm (S13)	91 (67)	12 (9)	495	4,8	35
JRB ≤ 8 mm (S7/10)	83 (58)	10 (6)	463	6,8	36
JRB > 8 mm (Ausschuss)	79 (61)	9 (6)	452	9,4	25
Gesamtergebnis	85 (60)	11 (6)	472	6,7	96

Die Korrelation des mittleren Biege-Elastizitätsmoduls getesteter Prüfkörper mit den korrespondierenden Mittelwerten der SilviScan-3-Untersuchungen ergibt ein Bestimmtheitsmaß von 61 %. Analog gilt ein Bestimmtheitsmaß von 67 % für die Korrelation der Prüfkörperdichte mit der durch Röntgenabsorption gemessenen Rohdichte, was geringfügig höher ist als das von LACHENBRUCH et al. (2010) berechnete Bestimmtheitsmaß gleichen Probenarrangements. Für die bei Ortsauflösung 25 µm gemessenen Eigenschaften Rohdichte, Tracheidenwanddicke und Mikrofibrillenwinkel betragen die Bestimmtheitsmaße der Korrelationen mit dem Biege-Elastizitätsmodul 79 %, 82 % und 63 %. Werden die mittleren Spätholzanteile aller vermessenen Jahrringe mit den korrespondierenden Biege-Elastizitätsmoduln korreliert, ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 43 %. Frühere Untersuchungen betonen die Aussagekraft dieser Korrelation, da der Spätholzanteil Information zur Rohdichte und zum Mikrofibrillenwinkel integriert (BAWCOMBE et al. 2010, GERRY 1916). Allerdings gilt dies eher für adultes Holz, im juvenilen Holz übertrifft die Prognosestärke des Mikrofibrillenwinkels andere Eigenschaften (LACHENBRUCH et al. 2010). Als gewichtender Faktor werden für jeden der 20 Bäume die individuellen Bestimmtheitsmaße der Korrelation des Biege-Elastizitätsmoduls mit den Merkmalen zur Identifizierung juvenilen und adulten Holzes auf den jeweils bestimmten Eintritt in die adulte Phase angewendet (Annex, Tabelle 27). Der resultierende gemittelt-gewichtete Eintritt in die adulte Phase ermöglicht die Abgrenzung der Biege-Elastizitätsmoduln des juvenilen und adulten Holzes. Aus der hohen Auflösung gemittelte Biege-Elastizitätsmoduln juvenilen Holzes und adulten Holzes unterscheiden sich mit $7 \pm 6,3$ kN/mm² bzw. $13 \pm 9,7$ kN/mm² konklusiv voneinander (POLLET et al. 2013, LANGUM et al. 2009, BARRETT & KELLOGG 1991). Dies gilt auch für Vergleiche zwischen juvenilem Kern- und adultem Kern- und Splintholz. Abbildung 40 zeigt die mittleren lebensjährlichen Biege-Elastizitätsmoduln juvenilen und adulten Holzes und die Anzahl der Bäume, die in den jeweiligen Lebensjahren juveniles bzw. adultes Holz aufweisen. Lokale Extrema der mittleren lebensjährlichen Mikrofibrillenwinkel, Spätholzanteile und Rohdichten beeinflussen den Elastizitätsmodul, der mit den folgenden Charakteristika adulten Holzes zunimmt: kleinere Mikrofibrillenwinkel, höhere Spätholzanteile und höhere Rohdichten (BAWCOMBE et al. 2010, LACHENBRUCH et al. 2010, EVANS 2009, KECKES et al. 2004).

Abbildung 40 Mittlerer Biege-Elastizitätsmodul und Standardabweichung des juvenilen Holzes (gelb) [kN/mm²], mittlerer Elastizitätsmodul und Standardabweichung des adulten Holzes (grün) [kN/mm²], mittlere Rohdichte (hellrot, gepunktet) [kg/m³, u~7 %], mittlerer Spätholzanteil (dunkelrot, gestrichelt) [%], mittlerer Mikrofibrillenwinkel (blau, gestrichelt) [°] und Anzahl der Jahrringe von juveniler und adulter Rohdichte (Balken, Farben entsprechend, $n_{kA5} = 2$, $n_{kA6} = 9$, $n_{kA7} = 15$, $n_{kA8} = 19$, $n_{kA42} = 15$, $n_{kA43-44} = 5$) mit kambialem Alter [a].



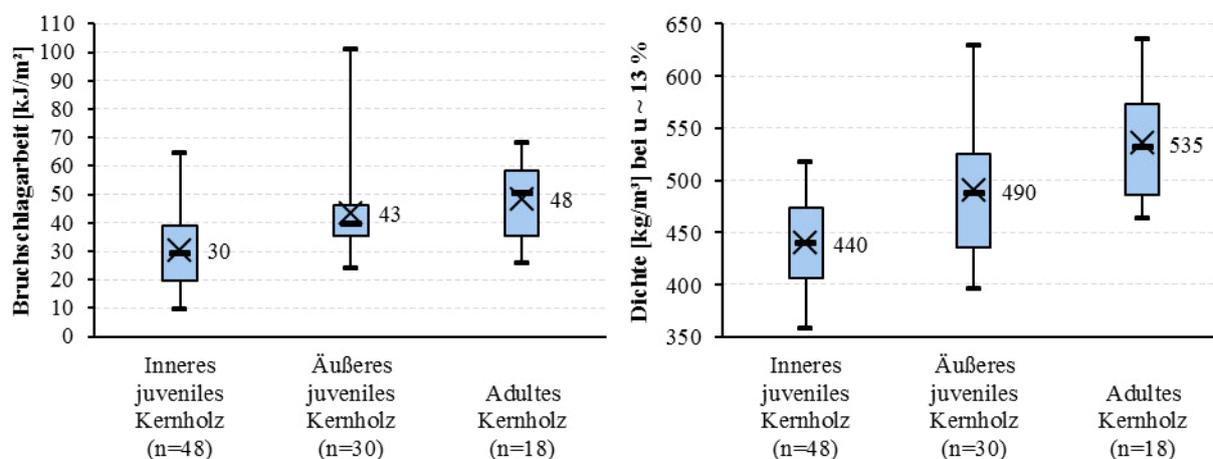
Der Vergleich bestimmter Biegefestigkeiten und Biege-Elastizitätsmoduln kleiner fehlerfreier Prüfkörper zeigen eine gute Übereinstimmung mit der mittleren Biege-Festigkeit etwa 60-jähriger wallonischer Douglasie, circa 70-jähriger baden-württembergischer und bis zu 70 Jahre alter nordwestdeutscher Douglasie und während die mittleren Biege-Elastizitätsmoduln dieser älteren Bäume mit 12 bis 15 kN/mm² höher sind (POLLET et al. 2013, MÖHLER & BEYERSDORFER 1987, KNIGGE 1958). Die mittleren Biegefestigkeiten und Biege-Elastizitätsmoduln von Douglasien aus der Eifel, Rheinland-Pfalz und Nordostdeutschland übertreffen Werte des untersuchten Holzes teilweise sehr deutlich, wobei auch die mittleren Rohdichten höher sind (HAPLA 1986, GÖHRE 1958, PECHMANN & COURTOIS 1970). Verglichen mit dem Biege-Elastizitätsmodul englischer Douglasie sind insbesondere die Werte des untersuchten adulten Kernholzes höher (BAWCOMBE 2012). In Amerika wird neben der Nennung von Kennwerten der Douglasie gefordert, das Wuchsgebiet anzugeben, da die mechanischen Eigenschaften des Holzes aus verschiedenen den Wuchsgebieten variieren. Eine mittlere Biegefestigkeit von 85 N/mm² bei 12 % Holzfeuchte für Küstendouglasie kommt dem untersuchten Holz am nächsten, doch der korrespondierende Biege-Elastizitätsmodul ist mit 13 kN/mm² höher (FOREST PRODUCTS LABORATORY 1999). Mittelwerte 20-jähriger amerikanischer Küstendouglasie liegen mit einer Biegefestigkeit von 66 N/mm² bzw. einem Biege-Elastizitätsmodul von 9170 N/mm² sowohl unter dem globalen, als auch dem Mittelwert des inneren juvenilen Holzes der untersuchten Bäume (LANGUM et al. 2009). Für Kanthölzer dokumentierte

Biegefestigkeiten sind aufgrund der Zulässigkeit von Schwachstellen niedriger als die Eigenschaften fehlerfreier Prüfkörper (SAUTER 1992, MÖHLER & BEYERSDORFER 1987, GÖHRE 1958).

4.2.4 Bruchschlagarbeit

Die mittlere Bruchschlagarbeit der 96 getesteten Prüfkörper beträgt 38 ± 16 kJ/m². Makroskopisch betrachtet ähneln sich die Bruchbilder der Prüfkörper aus den statischen und dynamischen Biegefestigkeitsuntersuchungen mit überwiegend kurzfasrig gebrochenem Frühholz und hervorstehenden bzw. ausgerissenen Tracheidenbündeln im Spätholz. Wie in Abbildung 42 dargestellt, sind allerdings einige Prüfkörper gänzlich kurzfasrig gebrochen. Die Zuordnung der Prüfkörper zum juvenilen und adulten Holz gilt wie für die Druckprüfung, da die untersuchten Bereiche identisch sind. Daher sind Korrelationen der mechanischen Eigenschaften zulässig. Bestimmtheitsmaße der Beziehung von bereichswisen Mittelwerten der Bruchschlagarbeit mit der statischen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit betragen 66 % bzw. 69 %, und 78 % bzw. 83 % mit den entsprechenden Elastizitätsmoduln. Abbildung 41 zeigt den Vergleich der Teilkollektive juvenilen und adulten Kernholzes. Jeweils konklusive Unterschiede bestehen zwischen der mittleren Bruchschlagarbeit des inneren juvenilen Kernholzes mit 30 ± 14 kJ/m² und den Mittelwerten äußeren juvenilen und adulten Kernholzes (GÖHRE 1958). Diese sich in ihrem kambialen Alter teilweise überschneidenden Kollektive zeigen bei mittleren Bruchschlagarbeiten von 43 ± 15 kJ/m² bzw. 48 ± 13 kJ/m² keinen signifikanten Unterschied. Bei einer mittleren Holzfeuchte von 13 % im juvenilen und 14 % im adulten Kernholz steigt die Rohdichte der Teilkollektive mit mindestens signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten 440 kg/m³, 490 kg/m³ bzw. 535 kg/m³.

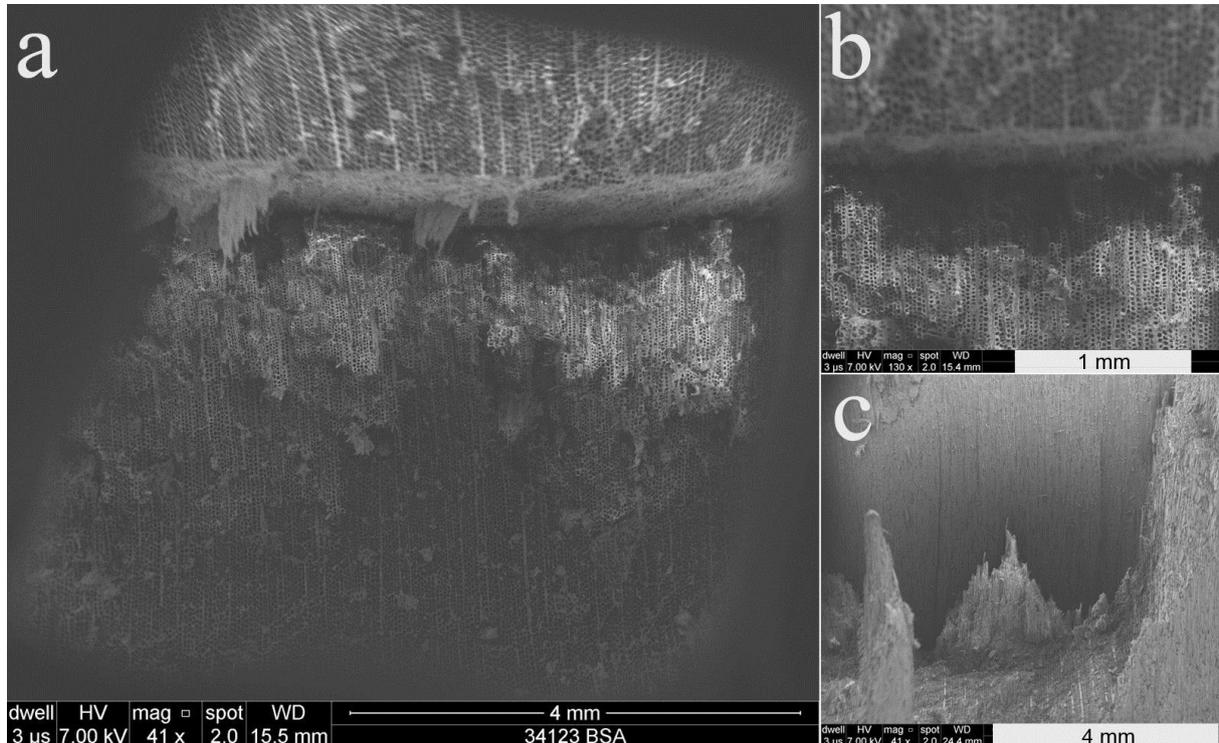
Abbildung 41 Bruchschlagarbeit (links) [kJ/m²] und Rohdichte bei $u \sim 13$ % (rechts) [kg/m³] der drei Teilkollektive juvenilen und adulten Kernholzes.



Wird die Bruchschlagarbeit mit der mittleren Jahrringbreite der Prüfkörper korreliert, ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 29 %, das die Tendenz zu abnehmender Bruchschlagarbeit mit zunehmender Jahrringbreite anzeigt. Mit kurzfasrigen Bruchflächen bei 18 Prüfkörpern aus dem inneren juvenilen

Kernholz ist eine mittlere Jahrringbreite von im Mittel 8,7 mm verbunden. Allerdings sind nicht die Jahrringbreiten für eine konklusiv niedrigere Bruchschlagarbeit von 19 kJ/m² im Vergleich zu langfaserigen Brüchen mit 42 kJ/mm² verantwortlich: die 18 langfaserig gebrochenen Prüfkörper mit im Mittel 8,9 mm höchster mittlerer Jahrringbreite weisen eine mittlere Bruchschlagarbeit von 37 kJ/m² auf. Die kurzfasigerig gebrochenen Prüfkörper unterscheiden sich allerdings durch nur begrenzt mit den Jahrringbreiten korrelierende marginale Spätholzanteile von etwa 10 bis 15 % von den langfaserig gebrochenen Prüfkörpern. Eine Untersuchung polnischer Douglasie nennt ein rohdichteabhängiges Verhältnis von 1 : 4,2 der Bruchschlagarbeiten Früh- und Spätholzes (RACZKOWSKI 1963). Der konklusive Rohdichteunterschied zwischen dem kurz- bzw. langfaserig gebrochenen Kollektiv liegt bei etwa 100 kg/m³.

Abbildung 42 Charakteristische Bruchfläche eines kurzfasigerig gebrochenen Prüfkörpers zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit (25 kJ/m²) aus dem äußeren juvenilen Kernholz. a) Querschnittsübersicht mit Jahrringgrenze: Das Frühholz (oberer Bildrand, unscharf) ist kurzfasigerig gebrochen, auch das marginale Spätholz (unterer Bildrand) eher kurzfasigerig gebrochen, Messbalken entspricht 5 mm. b) Detail der Jahrringgrenze mit geringem longitudinalen Unterschied in der Ausrisstiefe des Spätholzes, Messbalken 1 mm. c) Tangentiales Detail eines hervorstehenden Tracheidenbündels des Spätholzes, Messbalken 4 mm.



Ein globales Bestimmtheitsmaß der Beziehung zwischen Bruchschlagarbeit und Rohdichte von 49 % erklärt den gleichläufigen Anstieg beider Eigenschaften von Teilkollektiven juvenilen und adulten Kernholzes. Innerhalb der Teilkollektive juvenilen und adulten Kernholzes sind die

Bestimmtheitsmaße mit 45 % im inneren juvenilen Kernholz, 42 % im äußeren juvenilen Kernholz und 14 % im adulten Kernholz kleiner. Der Vergleich gemessener bereichsweiser Prüfkörperdichte mit der in Brusthöhe mittels Röntgenabsorption bestimmter Rohdichte ergibt ein Bestimmtheitsmaß von 72 %, weshalb orientierende Korrelationen mit den anderen in Brusthöhe bestimmten Eigenschaften zulässig sind. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 19 % nimmt die Bruchschlagarbeit bei größeren Mikrofibrillenwinkeln ab. Steigende Spätholzanteile, Tracheidenwanddicken, Rohdichten und Tracheidenlängen bewirken eine Zunahme der Bruchschlagarbeit, wobei die Bestimmtheitsmaße dieser Zusammenhänge 37 %, 44 %, 44 % bzw. 23 % betragen. Die mittlere Bruchschlagarbeit des untersuchten Holzes ist deutlich geringer als die Mittelwerte rheinland-pfälzischer und nordwest- bzw. ostdeutscher Douglasie von 52-61 kJ/m² (PECHMANN & COURTOIS 1970, KNIGGE 1958, GÖHRE 1958). Während diese Vergleichswerte dem oberen Grenzwert amerikanischen Holzes ähneln, gleichen die ermittelten Werte dem unteren Grenzwert der für amerikanisches Holz dokumentierten Spanne (WAGENFÜHR & SCHEIBER 1985).

4.2.5 Quellung

Für die Charakterisierung des Quellverhaltens wurden systematisch Prüfkörper aus den Bereichen des inneren und äußeren Kernholzes untersucht. Mit zunehmender Holzfeuchte nehmen die Dimensionen und Rohdichten der 80 Prüfkörper zu, wobei jeweils die Darrdimensionen und -dichten bei 0 % Holzfeuchte als Bezugswerte gewählt werden. Die mittleren Darrdimensionen der Prüfkörper betragen longitudinal $19,9 \pm 0,1$ mm, radial $19,7 \pm 0,2$ mm und tangential $19,4 \pm 0,2$ mm – im Vergleich mit den mittleren Dimensionen nach dem Zuschnitt im Normalklima mit maximalen Standardabweichungen von 0,1 mm zeigt sich schon darin die anisotrope Dimensionsänderung. Sollen Aussagen zum Quellverhalten juvenilen und adulten Kernholzes getroffen werden, müssen die geprüften Kernholzbereiche wie die mechanischen Prüfkörper rechnerisch dem juvenilen und adulten Kernholz zuzuordnen sein. Dazu werden Differenz-Gleichungen gebildet: Minuend ist die Entfernung des ersten Splintholzjahrringes zum Mark, Subtrahenden sind die anhand der quellungsrelevanten Merkmale Mikrofibrillenwinkel, Spätholz, Rohdichte und Tracheidenwanddicke bestimmten radialen Ausmaße juvenilen Holzes der Bäume. Sind die Differenzen positiv, wird zusätzlich die Abholzigkeit des Baumes über 2 m Höhenzunahme subtrahiert, da Ausmaße juvenilen Holzes in Brusthöhe gelten, während die Prüfkörper aus dem angrenzenden Stammabschnitt entnommen sind. Als Beispiel berechnet sich für das äußere Kernholz von Baum 61 aus Lörrach:

1.	Entfernung des ersten Splintholzjahrringes zum Mark:	89,375 mm
–	Radiales Ausmaß juveniles Holz anhand Merkmal Mikrofibrillenwinkel:	78,175 mm
=	Prüfkörper liegt im adulten Kernholz.	11,2 mm
2.	Entfernung des ersten Splintholzjahrringes zum Mark:	89,375 mm
–	Radiale Prüfkörperdimension	20 mm
–	Radiales Ausmaß juveniles Holz anhand Merkmal Mikrofibrillenwinkel:	78,175 mm
=	Prüfkörper liegt im juvenilen Kernholz.	– 8,8 mm

Die Berechnung ergibt, dass der betrachtete Bereich identifiziert anhand des Merkmals Mikrofibrillenwinkel aus 11,2 mm adultem Holz und 8,8 mm juvenilem Holz besteht. Bereits ohne die Abholzigkeit der Bäume zu berücksichtigen, kann dieser Prüfkörper nur als intermediär gewertet werden, zumal auch anhand anderer Merkmale juveniles Holz identifiziert wird. Da nach diesen Berechnungen für nur einen der vier geprüften äußeren Kernholzbereiche adulte Eigenschaften angenommen werden dürfen, und anhand des Merkmals Spätholzanteil teilweise inneres Kernholz dem adulten Kernholz zugeordnet wird, sind anhand der untersuchten Bäume keine Aussagen zu juvenilem und adultem Kernholz zu treffen. Anstedessen wird lediglich zwischen den definierten Bereichen inneres und äußeres Kernholz unterschieden.

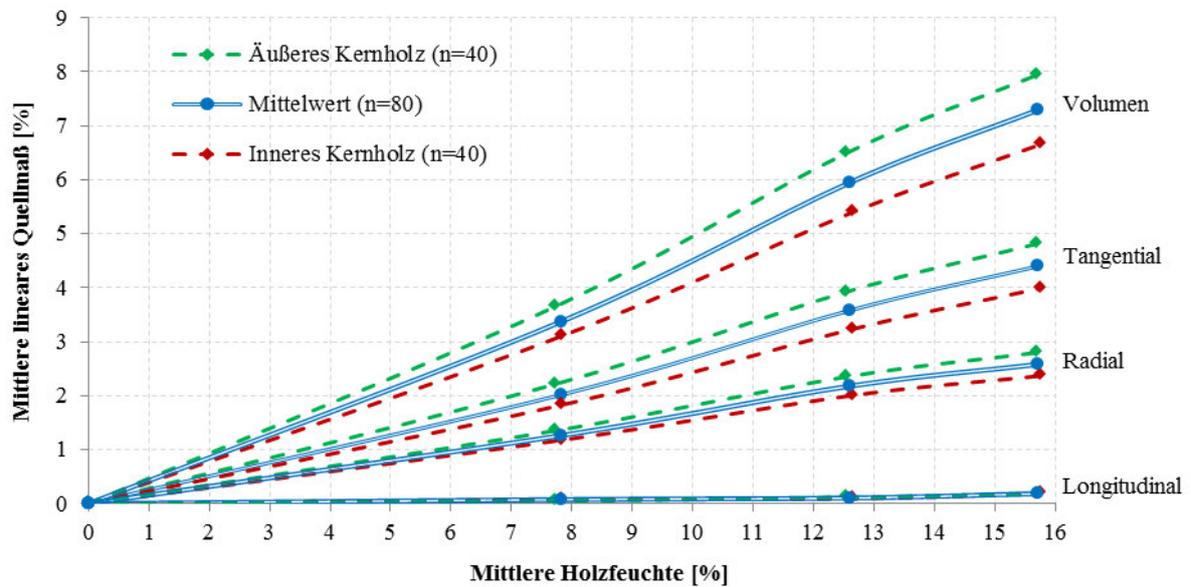
Tabelle 22 nennt die mittleren longitudinalen, radialen und tangentialen linearen Quellmaße sowie die mittleren Volumenquellmaße des inneren und äußeren Kernholzes bei aus den definierten Klimabedingungen resultierenden Holzfeuchten. In allen Klimata ist tangentiale lineare Quellung konklusiv stärker als die radiale lineare Quellung – sowohl im inneren, als auch im äußeren Kernholz (PANSHIN & DE ZEEUW 1980). Während das longitudinale lineare Quellmaß marginal ist, bestimmt die tangentiale lineare Quellung das Volumenquellmaß maßgeblich. Im Vergleich der Quellmaße inneren und dem äußeren Kernholzes nimmt das Signifikanzniveau von Unterschieden mit steigender Holzfeuchte zu. Wie in Abbildung 43 gezeigt, ist die mittlere radiale lineare Quellung des inneren Kernholzes im Trockenklima signifikant geringer als entsprechende Quellung des äußeren Kernholzes. Im Normal- und Feuchtklima bestehen dezisive Unterschiede zwischen den Bereichen mit einer Differenz der Quellmaße von 0,4 % im Feuchtklima. Analog ist das tangentiale lineare Quellmaß des inneren Kernholzes im Trockenklima dezisiv geringer als das im äußeren Kernholz. Bei höheren Holzfeuchten der Normal- und Feuchtklimata ergeben sich im Feuchtklima um 0,8 Prozentpunkte konklusiv höhere Quellmaße äußeren Kernholzes gegenüber dem inneren Kernholz.

Tabelle 22 Mittleres longitudinales (L), radiales (R), bzw. tangentiales (T) lineares Quellmaß [%] und Volumenquellmaß [%] des inneren (n = 40) und äußeren Kernholzes (n = 40) bei aus Klimabedingungen 20 °C und 0 / 35 / 65 / 85 % relativer Luftfeuchte resultierenden mittleren Holzfeuchten (u) [%].

Temperatur [°C] / relative Luftfeuchte [%]	Inneres Kernholz					Äußeres Kernholz				
	Lineares Quellmaß [%]					Lineares Quellmaß [%]				
	u [%]	L	R	T	Vol.- Quell- maß [%]	u [%]	L	R	T	Vol.- Quell- maß [%]
20 / 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 / 35	8 ± 0,7	0 ± 0,1	1 ± 0,3	2 ± 0,4	3 ± 0,7	8 ± 0,7	0 ± 0,1	1 ± 0,4	2 ± 0,5	4 ± 0,9
20 / 65	13 ± 0,3	0 ± 0,1	2 ± 0,4	3 ± 0,4	5 ± 0,5	13 ± 0,7	0 ± 0,1	2 ± 0,6	4 ± 0,5	6 ± 1,1
20 / 85	16 ± 0,3	0 ± 0,2	2 ± 0,4	4 ± 0,5	7 ± 0,6	16 ± 0,8	0 ± 0,1	3 ± 0,6	5 ± 0,5	8 ± 1,1

Aus dem Trocken- und Feuchtklima resultierende Holzfeuchten von im Mittel $8 \pm 0,7 \%$ bzw. $16 \pm 0,6 \%$ unterscheiden sich nicht signifikant zwischen dem inneren und äußeren Kernholz. Daher gleichen die Signifikanzniveaus von Unterschieden zwischen der differentiellen Quellung des inneren und äußeren Kernholzes der linearen Quellung. Die mittlere radiale differenzielle Quellung des inneren bzw. äußeren Kernholzes beträgt $0,15 \%$ bzw. $0,18 \%$, während die mittlere tangentiale differenzielle Quellung mit $0,27 \%$ bzw. $0,32 \%$ höher ist. Eine genaue Übereinstimmung der Mittelwerte des inneren Kernholzes mit Werten amerikanischer Douglasie deutet darauf hin, dass die Querschnittsquellung amerikanischen Holzes geringer als bei europäischen Anbauten ist (GROSSER & TEETZ 1998). Die Unterschiede der radialen und tangentialen Quellung des inneren und äußeren Kernholzes können auf die radiale Abnahme des mittleren Mikrofibrillenwinkels der geprüften Bereiche von 27 auf 13° zurückgeführt werden (HALE 1957). Zwar gelten diese Mittelwerte in Brusthöhe, doch analog zu Korrelationen der mechanischen Eigenschaften werden diese als orientierend angenommen. Im inneren Kernholz eher diagonal zur Zellachse ausgerichtete Mikrofibrillen bewirken bei zunehmender Wasseraufnahme eine stärkere longitudinale Quellung der Prüfkörper und geringere Dimensionsänderungen in den Querschnittsdimensionen (SARANPÄÄ 1994, SENFT et al. 1985). Neben der direkten Wirkung des Mikrofibrillenwinkels wird die Quellung beeinflusst durch mittlere Spätholzanteile der untersuchten inneren und äußeren Kernholzbereiche von 33% bzw. 42% in Brusthöhe. Wie bereits gezeigt, besteht einerseits ein intraanueiler Unterschied der Ausrichtung der Mikrofibrillen, andererseits nimmt der Spätholzanteil mit zunehmender Entfernung vom Mark zu, was den Anteil dickwandiger Tracheiden kleineren Mikrofibrillenwinkels erhöht. So beträgt die Quellung des Spätholzes nordostdeutscher Douglasie etwa das doppelte der Quellung des Frühholzes (GÖHRE 1958). Hinsichtlich des radialen Verlaufs der Tracheidenwanddicke wirkt außerdem die zunehmende Dominanz der Sekundärwand 2 gegenüber den Sekundärwänden 1 und 3 mit relativ großen Mikrofibrillenwinkeln (HALE 1957). Der quellungsmindernde Effekt einer radialen Absperrung des Gewebes durch Holzstrahlen wird für die vornehmlich einreihigen Holzstrahlen im Vergleich zur Wirkung des Mikrofibrillenwinkels als relativ gering angesehen (PANSHIN & DE ZEEUW 1980, BARBER & MEYLAN 1964). Eher könnten höhere Ligninkonzentrationen, wie sie allgemein für juveniles Holz angegeben werden, für hydrophobe Eigenschaften und eine daher geringere Wasseraufnahme verantwortlich sein (BENDTSEN 1978), doch besteht kein Unterschied zwischen den Wassergehalten der Prüfkörper inneren und äußeren Kernholzes. Die mittlere Quellungsanisotropie des inneren und äußeren Kernholzes beträgt $1,89$ bzw. $1,88$, was bei Interquartilsabständen von $0,5$ bzw. $0,4$ gut mit für amerikanische Douglasie dokumentierten Werten übereinstimmt (FOREST PRODUCTS LABORATORY 1999, GROSSER & TEETZ 1998). Die ermittelten Quellungseigenschaften gelten für vier Bäume, die nach dem Wachstumsmodell ‚BHD 40‘ gewachsen sind. Da dieses im Vergleich zu den anderen Wachstumsmodellen als eher langsam gelten muss, ist zu vermuten, dass schnellwüchsiges Holz mit größeren Mikrofibrillen nahe des Marks eine verminderte Querschnittsquellung und eine stärkere Längsquellung zeigt.

Abbildung 43 Mittleres longitudinales, radiales bzw. tangenciales lineares Quellmaß [%] und Volumenquellmaß [%] des äußeren Kernholzes (grün, n = 40) und inneren Kernholzes (rot, n = 40) sowie des Mittelwertes beider Bereiche (blau, n = 80) bei aus Klimabedingungen 20 °C und 0 / 35 / 65 / 85 % relativer Luftfeuchte resultierenden mittleren Holzfeuchten [%].



4.3 Biochemische Eigenschaften

Qualitätsbestimmend für das Kernholz der Douglasie sind neben den anatomischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften auch die biochemischen Eigenschaften. Laborprüfungen der natürlichen Dauerhaftigkeit geben Aufschluss über die Resistenz des Kernholzes gegen Holzabbau durch Basidiomyceten. Anhand des Extraktstoff- und Taxifolingehaltes und der Ligninkonzentration ausgewählter Prüfkörper und der Kontrollproben wird zusätzlich die Ursache der natürlichen Dauerhaftigkeit untersucht. Zudem charakterisieren elektronenmikroskopische Darstellungen den Holzabbau durch *P. placenta*. In Analogie zu den mechanischen Prüfungen wird der geprüfte äußere Kernholzbereich von jeweils zehn Bäumen dem juvenilen bzw. adulten Holz zugeordnet. Da anhand des Merkmals Spätholzanteil relativ junge Eintrittsalter in die adulte Phase identifiziert werden, gelten neun geprüfte innere Kernholzbereiche bereits als adultes Holz. Zusätzlich identifizieren die Merkmale Tracheidenwanddicke und Mikrofibrillenwinkel bei jeweils einem dieser Bäume adultes Holz. Die natürliche Dauerhaftigkeit von Holz wird allgemein stärker durch die mehrere Jahre nach der Holzbildung einsetzende Synthese und Einlagerung von bioziden Inhaltsstoffen, als durch die anatomische Struktur beeinflusst (HAUPT et al. 2003, RUDMAN 1963). Daher wird die Dauerhaftigkeit des geprüften inneren und äußeren Kernholzes nicht separiert nach juvenilem und adultem Holz quantifiziert.

4.3.1 Natürliche Dauerhaftigkeit

In drei an DIN 350-1 (1994) angelehnten Laborprüfungen wurde die natürliche Dauerhaftigkeit inneren und äußeren Kernholzes ermittelt. Die Prüfungen sind gültig, da die in Tabelle 23 genannten mittleren Masseverluste der Referenzprüfkörper über den in DIN 113 (1996/prA1 2003) geforderten Mindestwerten liegen. In den beiden 16-wöchigen Prüfungen durch *P. placenta* bzw. *C. puteana* verursachte mittlere Masseverluste an den Referenzprüfkörpern unterscheiden sich nicht signifikant, was bedeutet, dass die Virulenz dieser Basidiomyceten in den Prüfungen sehr ähnlich ist und die Prüfungen gemeinsam ausgewertet werden dürfen. Deshalb werden zur Auswertung der natürlichen Dauerhaftigkeit neben den zur Klassifizierung relevanten χ -Werten auch die korrigierten Masseverluste der Prüfkörper aus Douglasien-Kernholz betrachtet. Zur Beurteilung der Abbauaktivität von *C. versicolor* wird der an Kiefern-Splintholz hervorgerufene mittlere Masseverlust verwendet. Der an Buchenholz hervorgerufene mittlere Masseverlust von $38 \pm 3,2$ % bestätigt lediglich die Virulenz dieses eher für Laubholz relevanten Weißfäuleerregers. Während einer Expositionsdauer von 16 Wochen durch die jeweiligen Basidiomyceten an Douglasien-Kernholz aus dem Standraumversuch hervorgerufene χ -Werte unterscheiden sich konklusiv voneinander. Den stärksten Holzabbau verursacht *P. placenta*, gefolgt von *C. puteana*, *C. versicolor* und *G. trabeum*. Abbildung 44 zeigt die χ -Werte des inneren und äußeren Kernholzes, die außer bei *G. trabeum* einen Trend dezisiv höherer Dauerhaftigkeit im äußeren Kernholz bestätigen (SCHEFFER & ENGLERTH 1952). Teilweise berechnete negative χ -Werte ergeben sich aus den Korrekturtermen der Prüfkörper ohne

Basidiomycetenangriff. Da diese Prüfkörper keine Auffälligkeiten zeigen, wird der Korrekturterm auf alle Prüfkörper mit Basidiomycetenangriff angewandt. Zur Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit nach DIN 350-1 (1994) sind die mittleren x -Werte des Basidiomyceten relevant, der den höchsten Masseverlust hervorruft. Sowohl das innere, als auch das äußere Kernholz werden anhand der für *P. placenta* bestimmten mittleren x -Werte von 0,77 bzw. 0,71 der Dauerhaftigkeitsklasse 4 (wenig dauerhaft) zugeordnet.

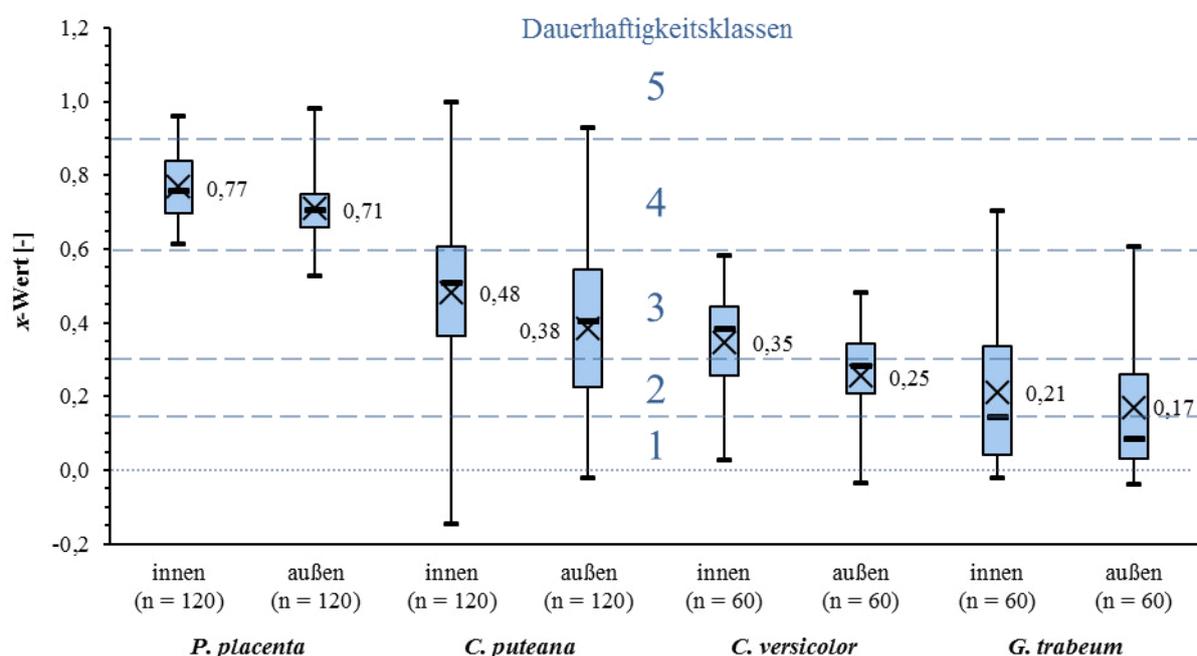
Tabelle 23 Mittlere Masseverluste [%] hervorgerufen durch *C. puteana*, *P. placenta*, *G. trabeum* und *C. versicolor* an Referenzprüfkörpern (n = 10) aus *P. sylvestris*-Splintholz und *F. sylvatica* in verschiedenen Prüfungen.

Prüfung	Herbst 2012 (16 Wochen)	Winter 2013 (16 Wochen)	Winter 2014 (8 Wochen)	
Prüfkörpermaße (rad. x tan. x long.) [mm ³]	25 x 15 x 50	25 x 15 x 50	30 x 30 x 5	40 x 25 x 5
<i>C. puteana</i>	21 ± 4,4 %	22 ± 4,7 %	40 ± 8,2 %	40 ± 4,0 %
<i>P. placenta</i>	25 ± 3,3 %	24 ± 1,8 %	42 ± 11,3 %	39 ± 26,4 %
<i>G. trabeum</i>	30 ± 1,3 %	-	-	-
<i>C. versicolor</i>	-	21 ± 1,6 %	-	-

Die nächsthöchsten mittleren x -Werte inneren und äußeren Kernholzes verursacht *C. puteana* – wäre dieser Basidiomycet relevant, erfolgte eine Klassifizierung in Dauerhaftigkeitsklasse 3 (mäßig dauerhaft). Aufgrund der geringen Abbauaktivität von *G. trabeum* in der ersten Prüfung wurde dieser in der zweiten Prüfung durch *C. versicolor* ersetzt. Da auch dieser Basidiomycet keinen hohen Masseverlust hervorruft, konzentriert sich die Auswertung auf *P. placenta* und *C. puteana*, die auch für die verkürzte Prüfung berücksichtigt wurden. Während *P. placenta* eher uniforme korrigierte Masseverluste von $18 \pm 2,0$ % hervorruft, beträgt der konklusiv geringere mittlere korrigierte Masseverlust durch *C. puteana* $9 \pm 4,5$ %. Durch die starke Variation der korrigierten Masseverluste dieses Basidiomyceten liegt ein Drittel der Prüfkörper in den Grenzen der Dauerhaftigkeitsklasse 2. Beurteilt anhand der akkumulierten x -Werte des relevanten Basidiomyceten *P. placenta* ist das Kernholz aus Ehingen am wenigsten dauerhaft, während sich die Dauerhaftigkeit des Holzes der anderen Standorte nicht signifikant voneinander unterscheidet. Ein Trend zu höherer Dauerhaftigkeit des äußeren Kernholzes im Vergleich zum inneren Kernholz zeigt sich teilweise auch auf Standortebene. So weist das äußere Kernholz der Standorte Lörrach und Löwenstein nach Holzabbau durch *P. placenta* konklusiv bzw. dezisiv niedrigere x -Werte auf als das entsprechende innere Kernholz. Ebenso besteht ein dezisiver Unterschied zwischen den x -Werten inneren und äußeren Kernholzes des Standortes Löwenstein nach Basidiomycetenangriff durch *C. puteana*. Keiner dieser Unterschiede hätte allerdings eine aufwertende Klassifizierung zur Folge. Alle anderen Differenzen

der x -Werte inneren und äußeren Kernholzes der Standorte zeigen ebenfalls den beschriebenen Trend, sind allerdings nicht signifikant.

Abbildung 44 x -Werte [-] der Prüfkörper inneren und äußeren Douglasien-Kernholzes, hervorgerufen durch *P. placenta* und *C. puteana* (jeweils $n = 120$) sowie *C. versicolor* und *G. trabeum* (jeweils $n = 60$) bei 16-wöchiger Exposition. Negative x -Werte durch Korrekturterm aus den Prüfkörpern ohne Basidiomycetenangriff. Dauerhaftigkeitsklassen (lang gestrichelte Abgrenzungen): 1 – sehr dauerhaft, 2 – dauerhaft, 3 – mäßig dauerhaft, 4 – wenig dauerhaft, 5 – nicht dauerhaft.

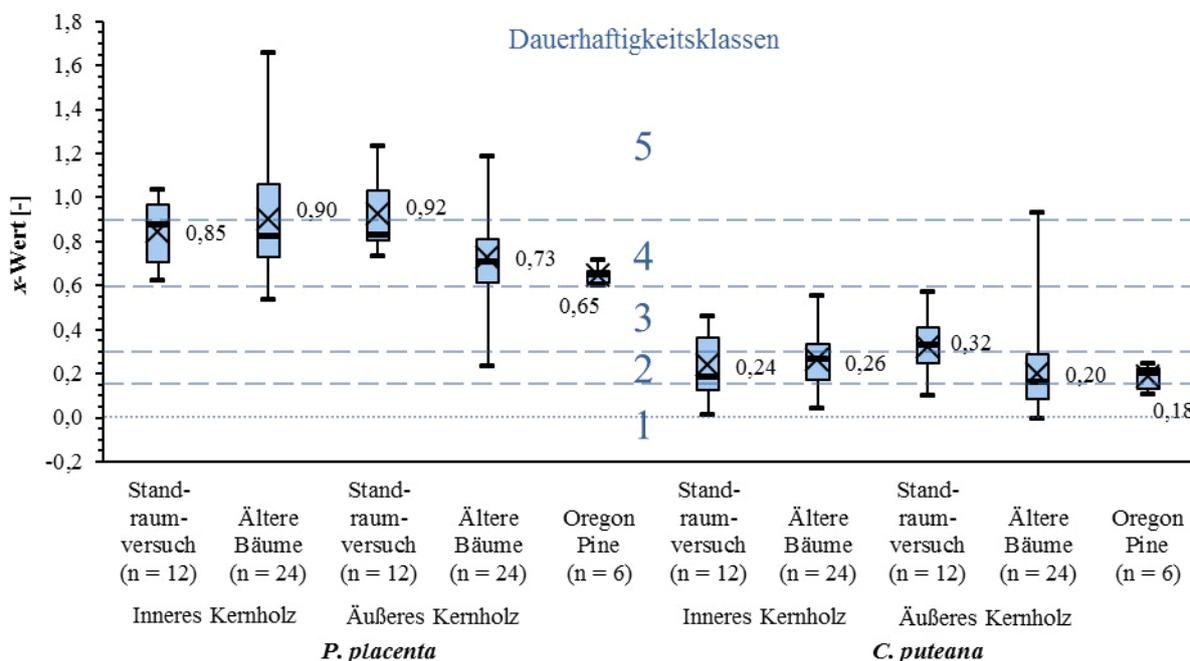


Um zu prüfen, ob die Wuchsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die natürliche Dauerhaftigkeit hat, bietet sich ein Vergleich der x -Werte der Wachstumsmodelle ‚langsam‘ und ‚schnell‘ an. Von *C. puteana* abgebautes, langsam gewachsenes äußeres Kernholz zeigt dezisiv niedrigere x -Werte als das entsprechende schnell gewachsene äußere Kernholz (SCHEFFER & ENGLERTH 1952). Zwischen den Werten inneren Kernholzes besteht kein signifikanter Unterschied, da sich – wie anhand der anatomischen Merkmale gezeigt – die waldbauliche Behandlung der untersuchten Douglasien weniger auf das marknahe Holz auswirkt. Aufgrund der Uniformität der x -Werte nach Holzabbau durch *P. placenta* bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen langsam bzw. schnell gewachsenem inneren oder äußerem Kernholz.

In Abbildung 45 gezeigte x -Werte nach achtwöchiger Exposition wurden aus Masseverlusten ohne Korrekturterm berechnet, da für die verkürzte Prüfung keine Prüfkörper ohne Basidiomycetenangriff zur Verfügung standen. Die x -Werte sind mit ebenfalls ohne Korrekturterm berechneten x -Werten der 16-wöchigen Prüfung vergleichbar, denn die vier über beide Expositionsdauern geprüften Bereiche zeigen nur in einem von acht Vergleichen der x -Werte einen dezisiven Unterschied.

Signifikant niedrigere x -Werte des äußeren Kernholzes bestätigen den am Holz aus dem Standraumversuch bei 16-wöchiger Exposition festgestellten Trend höherer Dauerhaftigkeit im äußeren Kernholz auch bei älteren Bäumen. Zudem ist das durch *P. placenta* und *C. puteana* abgebaute äußere Kernholz der älteren Bäume dezisiv bzw. signifikant dauerhafter als das äußere Kernholz der Bäume aus dem Standraumversuch, wobei der Altersunterschied zwischen den Kollektiven etwa 37 Jahre beträgt. Die x -Werte des etwa gleichalten inneren Kernholzes der Bäume aus dem Standraumversuch und der älteren Bäume hingegen zeigen keinen signifikanten Unterschied. Trotzdem resultiert aus den durch *P. placenta* hervorgerufenen mittleren x -Werten, dass sowohl das innere und äußere Kernholz aus dem Standraumversuch, als auch die derart unterschiedenen Bereiche des älteren Holzes entweder Dauerhaftigkeitsklasse 4 oder 5 (nicht dauerhaft) nach DIN 350-1 (1994) zuzuordnen sind (Abbildung 45). Das Kernholz des *Oregon pine*-Bretts wird anhand des durch ebenfalls den von *P. placenta* hervorgerufenen mittleren relativen Masseverlust der Dauerhaftigkeitsklasse 4 zugeordnet.

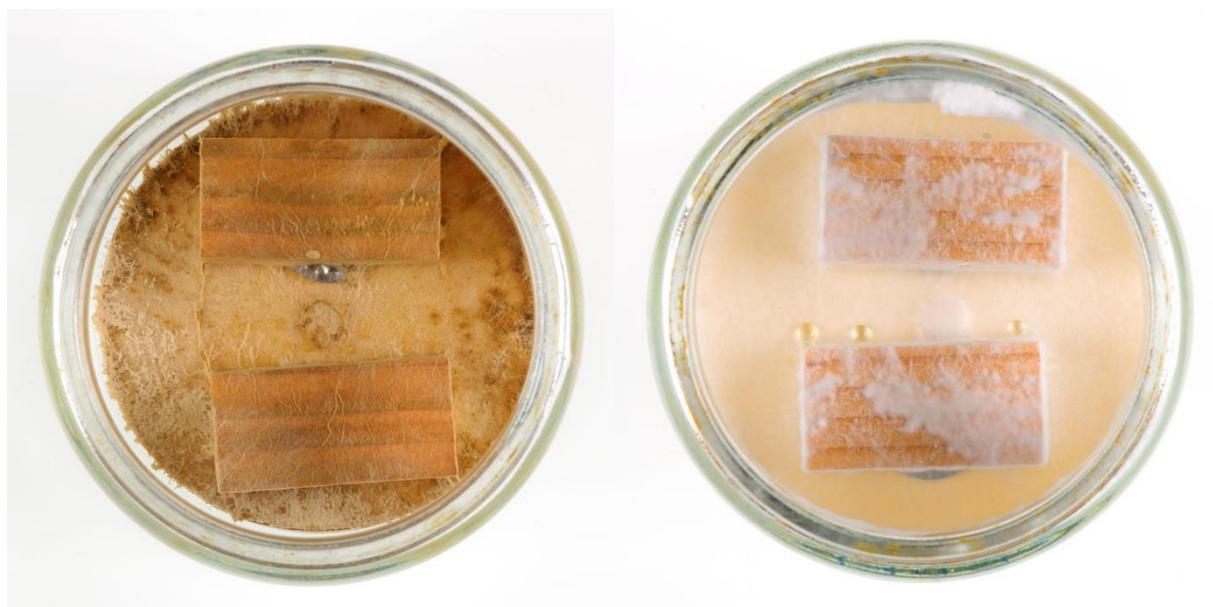
Abbildung 45 x -Werte [-] der Prüfkörper inneren und äußeren Kernholzes aus dem Standraumversuch ($n = 12$), des inneren und äußeren Kernholz älterer Baume aus Kändern ($n = 24$) und eines *Oregon Pine*-Brettes ($n = 6$), hervorgerufen durch *P. placenta* und *C. puteana* bei 8-wöchiger Exposition. Dauerhaftigkeitsklassen (lang gestrichelte Abgrenzungen): 1 – sehr dauerhaft, 2 – dauerhaft, 3 – mäßig dauerhaft, 4 – wenig dauerhaft, 5 – nicht dauerhaft.



Vier Kernholzbereiche wurden beiden 16-wöchigen Prüfungen unterzogen. Die aus dem Holzabbau durch *C. puteana* resultierenden mittleren x -Werte dieser Bereiche variieren zwischen den Prüfungen von 3 bis 57 %. Da die mittleren x -Werte der Bereiche nach Holzabbau durch den relevanten Basidiomyceten *P. placenta* von 1 bis 16 % schwanken und immer innerhalb der Grenzen der

Dauerhaftigkeitsklasse 4 liegen, kann die Klassifizierung als reproduzierbar angesehen werden. Diese unabhängig von der Expositionsdauer getroffene Klassifizierung des geprüften Holzes spricht eher für die in DIN 350-2 (1994) ausgewiesene Dauerhaftigkeitsklasse 4 statt Dauerhaftigkeitsklasse 3 für Douglasien-Kernholz aus Europa. Derselben Dauerhaftigkeitsklasse wird im Labor nach DIN 350-1 (1994) bzw. der entsprechenden nationalen Norm Großbritanniens geprüfetes nord- und süddeutsches, sowie 26-jähriges englisches Douglasien-Kernholz zugeordnet (AUGUSTA 2007, AKHTER & HALE 2002a), wobei der jeweils relevante Basidiomycet *C. puteana* ist. Für das zusätzlich geprüfte *Oregon pine*-Brett – Referenzmaterial der Untersuchungen von AUGUSTA (2007) – wird somit unabhängig von den Basidiomyceten die gleiche Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit reproduziert. Ähnlich nach innerem und äußerem Kernholz unterscheidende Prüfungen belgischen Douglasienholzes (POLLET et al. 2012) klassifizieren beide Bereiche als wenig dauerhaft (Dauerhaftigkeitsklasse 4) gemäß der europäischen CEN/TS 15063 (2005) mit *P. placenta* als relevanten Basidiomyceten. Die Feststellung, dass das kambiiale Alter keinen Einfluss auf die in Laborprüfungen ermittelte natürliche Dauerhaftigkeit hat, bestätigen auch die durch *P. placenta* unter dem Synonym *Postia placenta* (Fr.) M. Larsen et Lombard verursachten Masseverluste an 34-jähriger amerikanischer Küstendouglasie (GARTNER et al. 1999).

Abbildung 46 Bewuchs von Douglasienprüfkörpern durch *C. puteana* (links) und *P. placenta* (rechts) nach 16-wöchiger Exposition. Maß der langen Kante der Prüfkörper: 50 mm. Aufnahmen: C. Waitkus.



Frühere Untersuchungen dokumentieren die natürliche Dauerhaftigkeit beeinflussende Zusammenhänge mit der Rohdichte (POLLET et al. 2012, REHBEIN & KOCH 2010, AKHTER & HALE 2002a). Von insgesamt 80 Prüfkörpern zur Bestimmung zur Klimafeuchte und -rohichte sind die normalklimatisierten Gewichte und Dimensionen bekannt. Gemäß DIN 350-1 (1994) darf das

Volumen aller Prüfkörpervolumen mit $18,75 \text{ mm}^3$ angesetzt werden, wenn die Abweichungen der Prüfkörpermaße von kleiner als $0,2 \text{ mm}$ sind. Da die Dimensionen der Prüfkörper zur Bestimmung der Klimafeuchte und -rohichte bis zu maximal $0,48 \text{ mm}$ von den geforderten Prüfkörpermaßen abweichen, dürfen die Rohdichten der Prüfkörper mit Basidiomycetenangriff nicht unter Annahme des Volumens $18,75 \text{ mm}^3$ berechnet werden. In Näherung des Zusammenhanges zwischen Rohdichte und natürlicher Dauerhaftigkeit können stattdessen die Klimagewichte mit den durch *P. placenta* und *C. puteana* hervorgerufenen x -Werten der jeweils 240 Prüfkörper bei 16-wöchiger Exposition korreliert werden. Die Korrelationskoeffizienten dieses Zusammenhanges betragen $-0,48$ bzw. $-0,24$, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Rohdichte nicht als genereller Zeiger der natürlichen Dauerhaftigkeit der untersuchten Douglasien dienen kann.

Tabelle 24 Bewuchsfläche und –dichteklassen und mittlere x -Werte [-] des Holzabbaus durch *C. puteana* und *P. placenta*.

Basidiomycet	Bewuchsfläche	Mittlerer x -Wert	Anzahl	Bewuchsdichte	Mittlerer x -Wert	Anzahl
<i>C. puteana</i>	kein Bewuchs	0	1	kein Bewuchs	0	1
	0 – 33 %	$0,1 \pm 0,1$	20	schwacher Bewuchs	$0,4 \pm 0,2$	137
	34 – 66 %	$0,4 \pm 0,2$	40	normaler Bewuchs	$0,5 \pm 0,2$	97
	67 – 99 %	$0,5 \pm 0,2$	177	dichter Bewuchs	$0,5 \pm 0,1$	5
	total überwachsen	$0,8 \pm 0,2$	2			
<i>P. placenta</i>	67 – 99 %	$0,8 \pm 0,1$	133	schwacher Bewuchs	$0,7 \pm 0,1$	101
	total überwachsen	$0,7 \pm 0,1$	107	normaler Bewuchs	$0,8 \pm 0,1$	139

Die nach Beendigung der Prüfungen vorgenommene Bonitierung ermöglicht eine Auswertung der Bewuchsfläche und –dichte nach ordinalen Merkmalen. Wie in Abbildung 46 gezeigt, werden von *C. puteana* abgebaute Prüfkörper meist zu größten Teilen mit relativ dünnem zimtfarbenen Mycel bewachsen, während *P. placenta* die Prüfkörper fast vollständig mit einem dichteren, weißen Mycel bedeckt. Die in Tabelle 24 genannten, durch *C. puteana* hervorgerufenen x -Werte der Bewuchsflächeklassen unterscheiden sich signifikant voneinander – mit Ausnahme der Klasse 66-99 % bewachsen zu vollständig bewachsen. Auch nach Holzabbau durch *P. placenta* besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den x -Werten der Bewuchsflächeklassen, was ebenso für die Bewuchsdichte gilt. Hingegen unterscheiden sich nur die von *C. puteana* hervorgerufenen x -Werte der Bewuchsdichteklassen schwach zu normal dicht bewachsen dezisiv voneinander. Somit nimmt sowohl die Bewuchsfläche, als auch die Bewuchsdichte mit abnehmender Dauerhaftigkeit zu. Jedoch kann anhand der Bewuchsfläche oder –dichte nicht auf das Ausmaß des Holzabbaus geschlossen werden, da beispielsweise schwach abgebaute Prüfkörper starken und dichten Bewuchs zeigen.

4.3.2 Extraktstoffgehalt abgebauter Proben und Kontrollen

Um den Zusammenhang zwischen dem Extraktstoffgehalt und der natürlichen Dauerhaftigkeit des Kernholzes der Douglasie zu beleuchten, wurden quantitative chemische Analysen (Bestimmung des Gesamtextraktstoffgehaltes) für ausgewählte Proben niedriger und hoher natürlicher Dauerhaftigkeit durchgeführt. Die 20 analysierten Kontrollproben aus dem Standraumversuch weisen einen mittleren Gesamtextraktstoffgehalt von $5,4 \pm 1,2$ % der darrtrockenen Holzmasse auf. Dieser ist summiert aus den Mittelwerten der Extraktstoffgehalte der einzelnen Lösemittelfractionen: $0,3 \pm 0,1$ % Petrolether, $3,2 \pm 0,7$ % Aceton/Wasser, $0,5 \pm 0,1$ % Ethanol/Wasser und $1,3 \pm 0,6$ % Wasser. Verglichen mit den Angaben des Acetonextraktstoffgehaltes für englische Douglasie und eines *second-growth* Stammes aus Oregon stimmt der mittlere Extraktstoffgehalt der Aceton/Wasserfraktion gut überein (AKHTER & HALE 2002b, GRAHAM & KURTH 1949). Werden die mittleren Extraktstoffgehalte auf den Gesamtextraktstoffgehalt bezogen, betragen die mittleren Anteile der Extraktstoffgehalte 60 % für Aceton/Wasser, 24 % für Wasser, 10 % für Ethanol/Wasser und 6 % für Petrolether. Die Aceton/Wasserextraktstoffgehalte enthalten phenolische Inhaltsstoffe und der Petroletherextrakt die vor allem die für die natürliche Dauerhaftigkeit von Koniferen relevanten Extraktstoffe aus der Gruppe der Harzsäuren (RUDMAN 1963, GRAHAM & KURTH 1949). Eine Korrelation der Masseverluste durch *P. placenta* bzw. *C. puteana* abgebauter Proben mit den Aceton/Wasser- und Petroletherextrakten der korrespondierenden Kontrollproben ergibt marginale Bestimmtheitsmaße, die darauf hindeuten, dass der Probenumfang zu gering zur Korrelation ist.

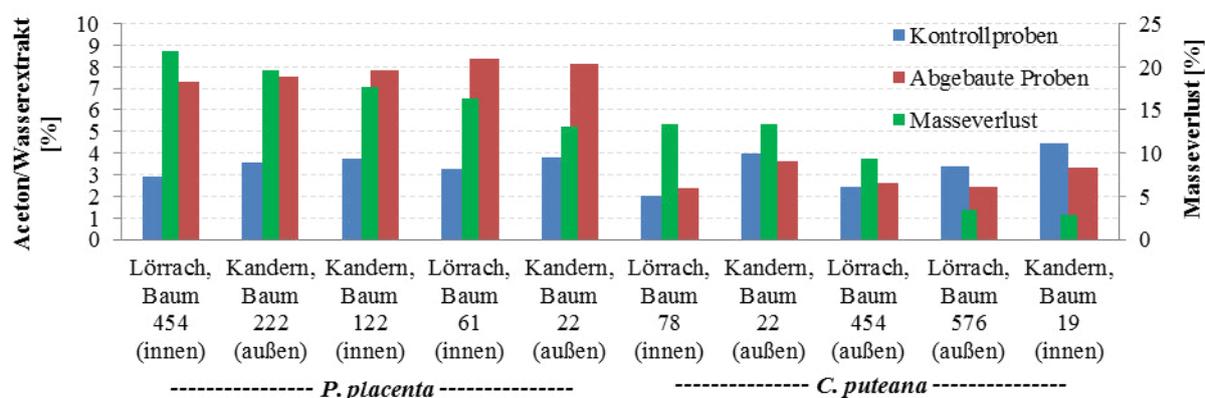
Abbildung 47 Durch *C. puteana* abgebaute Proben des äußeren Kernholzes eines der älteren Bäume aus Kandern; mittlerer x -Wert 0,07. Masseverluste: 61211: 0 %, 61212: 0,3 %, 61213: -0,1 %, 61214: 3,4 %, 61215: -0,2 % und 61216: 13,3 %. Prüfkörperkanten entsprechen 30 mm.



Eine der Kontrollproben aus dem äußeren Kernholz eines älteren Baumes aus Kandern fällt durch einen relativ hohen Petroletherextraktstoffgehalt von 1,0 % der darrtrockenen Holzmasse auf. In Abbildung 47 sind die entsprechenden, durch *C. puteana* abgebauten Prüfkörper dargestellt, deren marginaler mittlerer x -Wert 0,07 beträgt. Anhand dieses x -Wertes und der teilweise gering mit Mycel bewachsenen Prüfkörperoberflächen kann abgeleitet werden, dass höhere Petroletherextraktstoffgehal-

te die Resistenz gegen spezielle Basidiomyceten positiv beeinflussen. Die extrahierten Kontrollproben stammen zu gleichen Anteilen aus dem inneren und äußeren Kernholz, wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Extraktstoffgehalten inneren und äußeren Kernholzes bestehen. Werden die Extraktstoffgehalte zehn zusätzlich extrahierter abgebauter Proben mit den entsprechenden Kontrollproben verglichen, bestehen dezisive Unterschiede zwischen den Petrolether- und Ethanol/Wasser-Extrakten. Zuzüglich sich nicht signifikant unterscheidender Aceton/Wasser- und Wasser-Extrakten beträgt der mittlere Gesamt-Extraktstoffgehalt der zehn Kontrollproben $5,8 \pm 1,2 \%$ der absolut trockenen Holzmasse, während die abgebauten Proben einen Mittelwert von $8,3 \pm 3,0 \%$ aufweisen. Die höheren Aceton/Wasserextraktstoffgehalte der abgebauten Proben müssen auf eine Depolymerisation der Ligninbausteine durch den Basidiomycetenabbau zurückgeführt werden (BAUCH et al. 1975). Zwischen den Gesamt-Extraktstoffgehalten von abgebauten Proben und Kontrollproben besteht kein signifikanter Unterschied, da ein Interquartilsabstand der Aceton/Wasser-Extraktstoffgehalte abgebauter Proben von fünf Prozentpunkten die Variation der Gesamt-Extraktstoffgehalte der Kontrollproben abdeckt.

Abbildung 48 Aceton/Wasserextrakte [%] von Kontrollproben (blau, $n = 10$) und durch *P. placenta* und *C. puteana* abgebauten Proben (rot, $n_{pp} = n_{cp} = 5$) und Masseverluste der abgebauten Proben [%].



Die Aceton- und Ethanol/Wasserextrakte der abgebauten Proben unterscheiden sich durch eine dunklere Färbung von den entsprechenden Extrakten der Kontrollproben. Auch diese Intensivierung deutet auf die Depolymerisation von Lignin hin (BAUCH et al. 1975). Insbesondere durch *P. placenta* abgebaute Proben zeigen signifikant höhere Wasserextrakte und dezisiv höhere Aceton/Wasserextrakte als die durch *C. puteana* abgebauten Proben, wie in Abbildung 48 dargestellt. Während die von *C. puteana* zum Holzabbau genutzte Endo- und Exoglucanase sowohl amorphe, als auch kristalline Cellulose spaltet, wird für die in *P. placenta* vorkommende Endoglucanase angenommen, dass diese nur amorphe Cellulose spalten kann (MARTINEZ et al. 2009, SCHMIDT 2006). Diese Unterschiede der Enzymsysteme könnten auch für die Heterogenität acetonlöslicher Komponenten des Kernholzes verantwortlich sein.

4.3.3 Taxifolingehalt abgebauter Proben und Kontrollen

Die Dauerhaftigkeit des Kernholzes der Douglasie wird in frühen Untersuchungen auf die fungizide Wirkung des Flavanonols Taxifolin zurückgeführt (GARDNER & BARTON 1960, KENNEDY 1956). Aus der chromatographischen Analyse der Aceton/Wasserextrakte 20 extrahierter Kontrollproben resultiert ein durch qualitative HPLC-Analyse bestimmter mittlerer Taxifolingehalt von $1 \pm 0,5 \%$ der darrtrockenen Holzmasse, der mit den von GARDNER & BARTON (1960) und KENNEDY (1956) bestimmten Werten übereinstimmt. Ein Trend zu höheren Taxifolingehalten im äußeren Kernholz ist erkennbar, der Unterschied der Werte inneren und äußeren Kernholzes ist jedoch nicht signifikant. Die Taxifolingehalte der zehn zusätzlich analysierten abgebauten Proben sind mit $0,5 \pm 0,3 \%$ niedriger als für die entsprechenden Kontrollen bestimmt. Dabei sind die Differenzen der Taxifolingehalte zwischen den abgebauten Proben und angrenzenden Kontrollen deutlich größer als die jeweiligen Masseverluste. Jüngere Arbeiten dokumentieren eine fehlende Hemmwirkung von Taxifolin aus *Salix caprea* (L.) gegenüber *C. puteana* (MALTERUD et al. 1985), verhältnismäßig hohe inhibitorische Konzentrationen für *G. trabeum* und *C. versicolor* aus der Inhibitionsprüfung mit Agarplatten (SCHULTZ et al. 1995, CSERJESI 1969) und eine nicht signifikante Korrelation des Taxifolingehaltes mit Masseverlusten an Douglasie durch *P. placenta* (AKHTER & HALE 2002b). Diese schwach fungizide und in niedriger Konzentration das Basidiomycetenwachstum stimulierende Wirkung (RUDMAN 1962) des Taxifolins hat zur Folge, dass der Taxifolingehalt des untersuchten Holzes als nicht dauerhaftigkeitsrelevant bewertet wird. Für die in der Praxis beschriebene Dauerhaftigkeit der Douglasie ist nach RUDMAN (1962) eher die geringe Wasseraufnahmekapazität verantwortlich. So bleibt die Holzfeuchte von Douglasienholz bei Untersuchungen zur Freilandbewitterung immer unter 30 % (RAPP & PEEK 1999), was auch auf wasserabweisende Inhaltsstoffe zurückgeführt wird (RUDMAN 1962). In der Laborprüfung allerdings erhöhen *C. puteana* und *P. placenta* die aus dem Normalklima resultierende Holzfeuchte von 13 % während des Holzabbaus auf 20-69 % bzw. 44-101 %. Die von *C. puteana* eingestellte Holzfeuchte ist deutlich geringer als während des Abbaus englischer Douglasie, der Maximalwert von *P. placenta* ist hingegen deutlich höher als beschriebene Werte (AKHTER & HALE 2002a). Für die durch *C. puteana* abgebauten Referenzprüfkörper aus Kiefern-Splintholz beträgt die hervorgerufene Holzfeuchte 30-69 %. Diese Spanne reicht vom Minimum bis in den optimalen Bereich zum Abbau von Kiefern-Splintholz (HUCKFELDT & SCHMIDT 2015). Die Korrelation der Holzfeuchten während des Holzabbaus an Douglasie mit den x -Werten der Prüfkörper ergibt Bestimmtheitsmaße von 5 % bzw. 48 % für *P. placenta* und *C. puteana*. Damit ist das Ausmaß des Masseverlustes durch *C. puteana* stärker von der Holzfeuchte beeinflusst, während durch *P. placenta* hervorgerufene Masseverluste von der Holzfeuchte unabhängig erscheinen.

4.3.4 Ligninkonzentration abgebauter Proben und Kontrollen

Die normgemäß verwendeten Braunfäuleerreger *P. placenta* und *C. puteana* bauen die Hemicellulosen und Cellulose der Zellwand ab, während Lignin lediglich depolymerisiert und chemisch modifiziert

wird (BAUCH et al. 1975). Nicht mehr mit den Polysacchariden assoziierte Elektronenpaare des Lignins erhöhen die UV-Absorption der Zellwandkomponenten und führen zu einem relativen Anstieg der Ligninkonzentration.

Abbildung 49 Vergleich der UV-Absorption [-] bei 280 nm zwischen Spätholz-Scanning-Feldern repräsentativer Proben. Linke Spalte: Abgebaute Probe, mittlere UV-Absorption 0,42. Rechte Spalte: Entsprechende Kontrollprobe, mittlere UV-Absorption 0,37. a-b) Gescannte Zellen mit farblich skalierte UV-Absorption [-]. c-d) Absolute und kumulierte Häufigkeiten der Messpunkte in UV-Absorptionsklassen [-]. e-f) UV-Absorptionen [-] in a-b markierter Zellwände und Mittellamellen. g-h) Dreidimensionale Darstellung der UV-Absorption [-] nach Skala aus a-b.

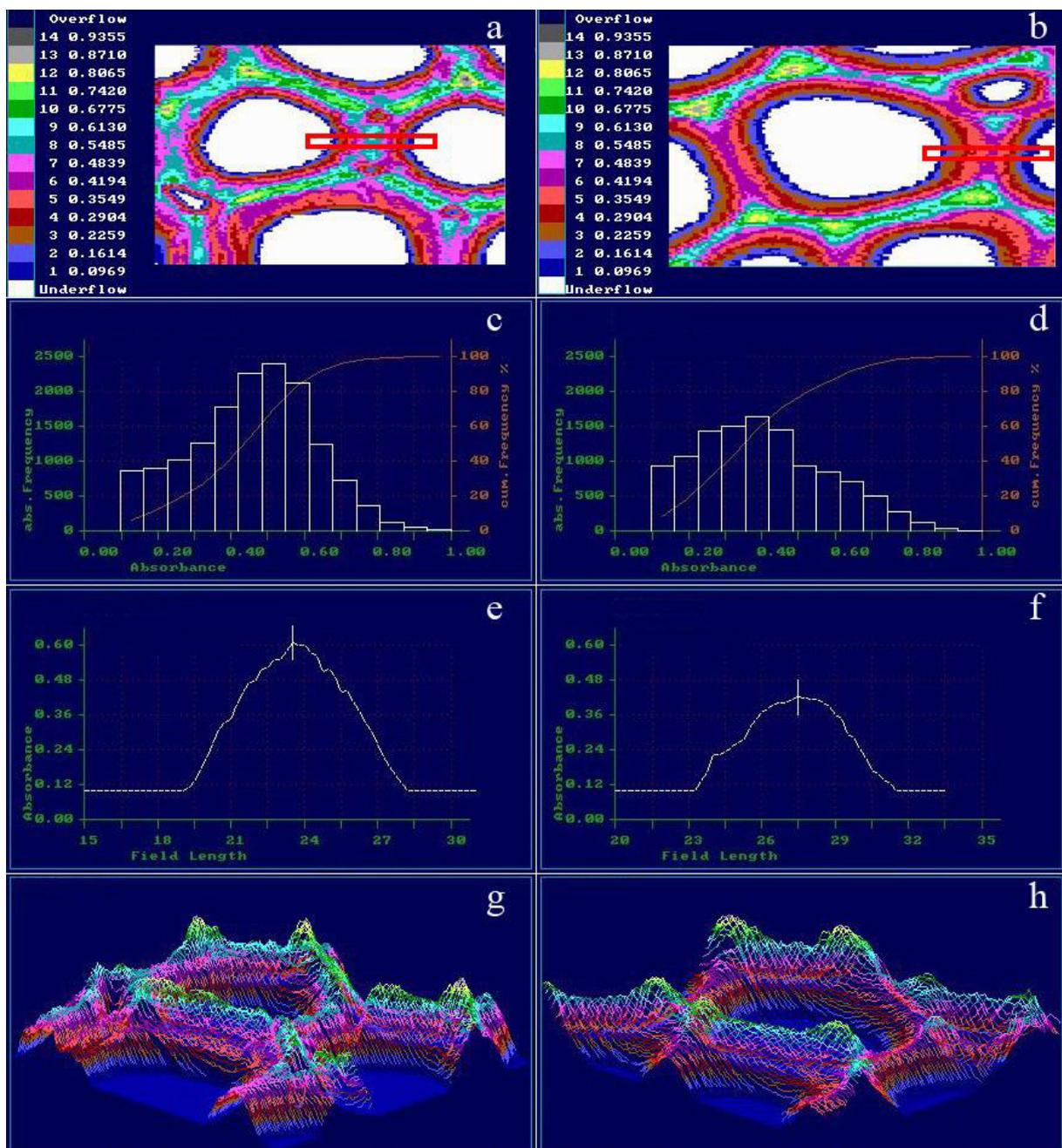


Abbildung 49 zeigt im UV-Absorptionsmaximum des Nadelholzlignins bei 280 nm gescannte Spätholz-Messfelder einer durch *P. placenta* abgebauten Probe und der entsprechenden Kontrolle. Anhand der absoluten und kumulativen Häufigkeiten der Messpunkte in den UV-Absorptionsklassen ist erkennbar, dass im abgebauten Feld deutlich mehr Messpunkte auf Klassen höherer Absorption entfallen, als im Feld der Kontrollprobe, was eine höhere relative Ligninkonzentration anzeigt. Die Zellwandschichten Sekundärwand 2 und Mittellamelle der Kontrollprobe absorbieren auf einem für Nadelholztracheiden bei 280 nm normalen Niveau (IRBE et al. 2006). Jeweils außerdem dargestellt ist die UV-Absorption einer von Lumen zu Lumen gescannten doppelten Zellwand mit Mittellamelle. Die maximalen UV-Absorptionen der Mittellamellen unterscheiden sich mit 0,6 für die abgebaute Probe und etwa 0,42 für die Kontrollprobe (Abbildung 49e-f) (FERGUS et al. 1969). Auch im Vergleich der Sekundärwände 2 zwischen der abgebauten Probe und der Kontrollprobe ist die Absorption der abgebauten Probe höher, woraus die mittlere UV-Absorption der abgebauten Probe und der Kontrollprobe von 0,42 bzw. 0,37 resultieren.

Wie Tabelle 25 zeigt, besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den UV-Absorptionswerten der 60 ausgewählten Scanning-Felder abgebauter Proben und den UV-Absorptionen der 60 Felder der Kontrollproben. Der Unterschied resultiert aus einer dezisiv höheren UV-Absorption der abgebauten Spätholztracheiden von im Mittel $0,46 \pm 0,06$ im Vergleich zum Mittelwert des Spätholzes der Kontrollproben von $0,40 \pm 0,05$. Zwischen den UV-Absorptionswerten des abgebauten Frühholzes und des Frühholzes der Kontrollproben besteht kein signifikanter Unterschied: einerseits ist der Anteil der vornehmlich von den Basidiomyceten abgebauten Sekundärwand (S2) in Relation zur Zellwanddicke deutlich geringer als im Spätholz, andererseits wird die UV-Absorption der Frühholztracheiden stärker von der Lignifizierung der Mittellamellen beeinflusst.

Tabelle 25 Mittlere UV-Absorption [-] der Scanning-Felder abgebauter Proben (n = 60) und der Scanning-Felder angrenzender Kontrollproben (n = 60), unterschieden nach Früh- und Spätholz und lichtmikroskopischen Befunden zum Holzabbau.

	Frühholz		Spätholz		Gesamt	
	Mittlere UV-Absorption [-]	Anzahl Felder	Mittlere UV-Absorption [-]	Anzahl Felder	Mittlere UV-Absorption [-]	Anzahl Felder
Kontrollproben	$0,39 \pm 0,03$	30	$0,40 \pm 0,05$	30	$0,40 \pm 0,04$	60
Abgebaute Proben:	$0,39 \pm 0,06$	30	$0,46 \pm 0,06$	30	$0,42 \pm 0,07$	60
- Holzabbau lichtmikroskopisch erkennbar	$0,40 \pm 0,07$	13	$0,46 \pm 0,07$	23	$0,44 \pm 0,07$	36
- Holzabbau lichtmikroskopisch nicht erkennbar	$0,39 \pm 0,05$	17	$0,45 \pm 0,04$	7	$0,40 \pm 0,06$	24

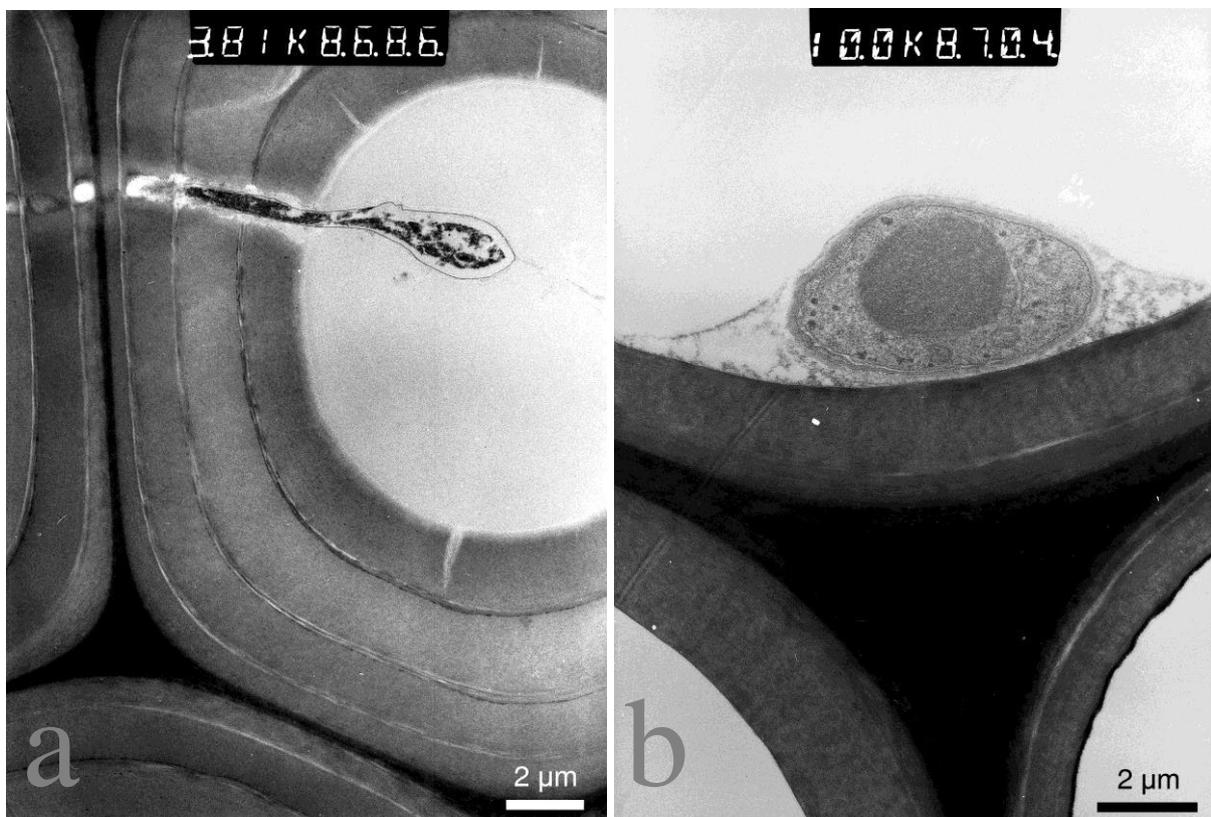
An den lichtmikroskopischen Präparaten, die zur Auswahl und Orientierung der UV-spektroskopischen Scanning-Felder hergestellt wurden, lassen sich die von den Basidiomyceten stark abgebauten Bereiche deutlich von den Zonen des Holzgewebes abgrenzen, die keine sichtbaren Anzeichen von Holzabbau zeigen. Zur lichtmikroskopischen Identifizierung abgebauter Bereiche dient

einerseits eine schwächere elektronendichteabhängige Färbung durch das verwendete Toluidinblau, andererseits die besonders in Holzstrahlernen Bereichen durch den Holzabbau verringerte Zellwanddicke des Späthholzes. Werden die UV-Absorptionen der Scanning-Felder aus zuvor lichtmikroskopisch identifizierten abgebauten Bereichen und Zonen ohne identifizierten Holzabbau miteinander verglichen, ist die UV-Absorption der Felder identifizierten Holzabbaus mit im Mittel $0,44 \pm 0,07$ signifikant höher als die UV-Absorption der Felder ohne identifizierten Holzabbau (Abbildung 49). Die Felder lichtmikroskopisch nachweisbaren Holzabbau weisen UV-Absorptionen auf, die sich nicht signifikant von den UV-Absorptionen der Felder der Kontrollproben unterscheiden. Abgebaute Proben zeigen nach 16-wöchiger Exposition lokale Zellwandbereiche, deren UV-Absorption den Werten von Holz ohne Basidiomycetenangriff entspricht – demnach erfolgt ein selektiver Holzabbau durch die Basidiomyceten. Die zusätzliche Unterscheidung der Messfelder nach Früh- und Spätholz mit und ohne identifizierten Holzabbau zeigt, dass keine signifikanten Unterschiede bestehen. Gleiches gilt für die Unterscheidung der Felder nicht identifizierten bzw. identifizierten Holzabbaus nach den Basidiomyceten *P. placenta* und *C. puteana*. Die Bereiche lichtmikroskopisch identifizierten Holzabbaus liegen eher zentral zwischen den Holzstrahlen (SINGH et al. 2006). Nach Untersuchungen zur Verteilung der Inhaltsstoffe des Kernholzes der Douglasie sind diese in hoher Konzentration nahe und in Holzstrahlen lokalisiert (SQUIRE et al. 1967). Somit kann selektiver Holzabbau abseits der Holzstrahlen als Präferenz inhaltsstoffarmer Bereiche interpretiert werden.

4.3.5 Elektronenmikroskopische Charakterisierung des Holzabbaus

Wie in Abbildung 50 exemplarisch für *P. placenta* gezeigt, besiedeln die Prüforganismen das untersuchte Holz und zeigen mit Bohrhyphe und einer Schleimschicht zum Enzymtransport an die Zellwände charakteristische Merkmale des Holzabbaus durch Basidiomyceten (HUCKFELDT & SCHMIDT 2015).

Abbildung 50 Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahmen durch *P. placenta* attackierten Douglasien-Kernholzes nach dreiwöchiger Exposition. a) Bohrhyphe beim Durchwachsen enzymatisch aufgelöster Sekundärwandschichten, Messbalken 2 μm b) Frühes Befallsstadium einer an der Tertiärwand anliegenden Hyphe mit Schleimschicht bei optisch intakter Zellwand, Messbalken 2 μm .



Diese hochauflösenden Untersuchungen ermöglichen eine diagnostische Beurteilung der Frühstadien eines Befalls der Zellwände durch Braunfäule verursachende Basidiomyceten (REHBEIN & KOCH 2011).

5 Konklusion

Die vorliegenden Untersuchungen an ausgewählten Douglasien süddeutscher Anbauggebiete liefern eine umfangreiche Charakterisierung anatomischer, physikalischer, mechanischer und biochemischer Eigenschaften. Die detaillierten Auswertungen zeigen, dass die angewandte segmentierte lineare Regression die Identifizierung von juvenilem und adultem Holz anhand der Merkmale Spätholzanteil, Tracheidenwanddicke, Rohdichte und Mikrofibrillenwinkel leistet. Wie in früheren Untersuchungen bereits beschrieben, unterscheidet sich das anhand der einzelnen Merkmale bestimmte kambiale Alter des Eintritts in die adulte Phase (BENDTSEN 1978). Für die untersuchten Stammscheiben aus Brusthöhe ergibt der Vergleich der mittleren kambialen Alter zur Beginn der Bildung adulten Holzes die Reihenfolge

- Spätholzanteil: Kambiales Alter 18,
- Tracheidenwanddicke: Kambiales Alter 20,
- Mikrofibrillenwinkel: Kambiales Alter 23 und
- Rohdichte: Kambiales Alter 25.

Die in Abbildung 51 dargestellten Korrelationen des Standraumes der Bäume mit dem mittleren Anteil juvenilen Holzes an der Radiusbreite in Brusthöhe zeigen Bestimmtheitsmaße von über 80 % für die drei Merkmale Spätholzanteil, Rohdichte und Mikrofibrillenwinkel. Das entsprechende Bestimmtheitsmaß für das Merkmal Tracheidenwanddicke beträgt lediglich 20 % und zeigt an, dass der Einfluss des Standraums auf die Tracheidenwanddicke gering ist. Aus den beschriebenen Zusammenhängen kann abgeleitet werden, dass kleinere Standräume von 2,5 m² und 5 m² die frühzeitige Bildung adulten Holzes induzieren. Größere Standräume von 10 m² oder 20 m² bewirken hingegen längere Phasen juveniler Holzbildung.

Abbildung 51 Mittlerer Anteil juvenilen Holzes an der Radiusbreite in Brusthöhe [%], identifiziert anhand der Merkmale Spätholzanteil (orange, $R^2 = 0,83$), Tracheidenwanddicke (weinrot, $R^2 = 0,20$), Rohdichte (blau, $R^2 = 0,86$) und Mikrofibrillenwinkel (grün, $R^2 = 0,82$) in Abhängigkeit vom Standraum [%]. $n_{2,5 \text{ m}^2} = 3$ Bäume, $n_{5 \text{ m}^2} = 7$ Bäume, $n_{10 \text{ m}^2} = 6$ Bäume und $n_{20 \text{ m}^2} = 4$ Bäume.

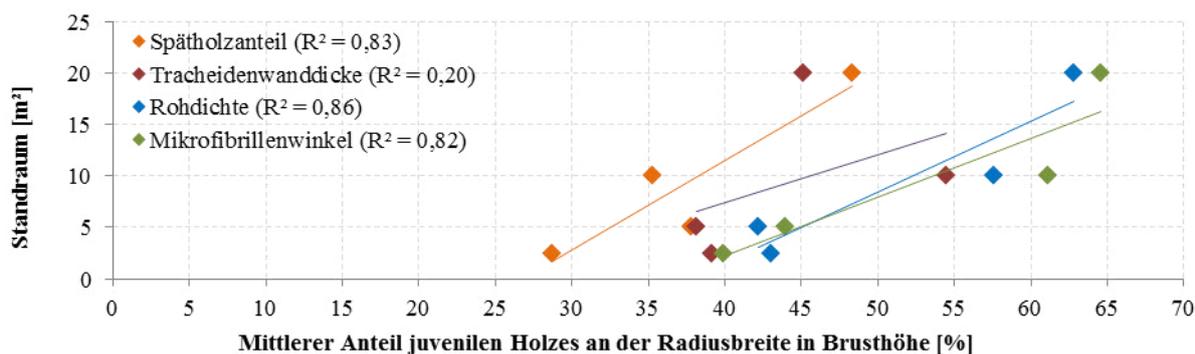
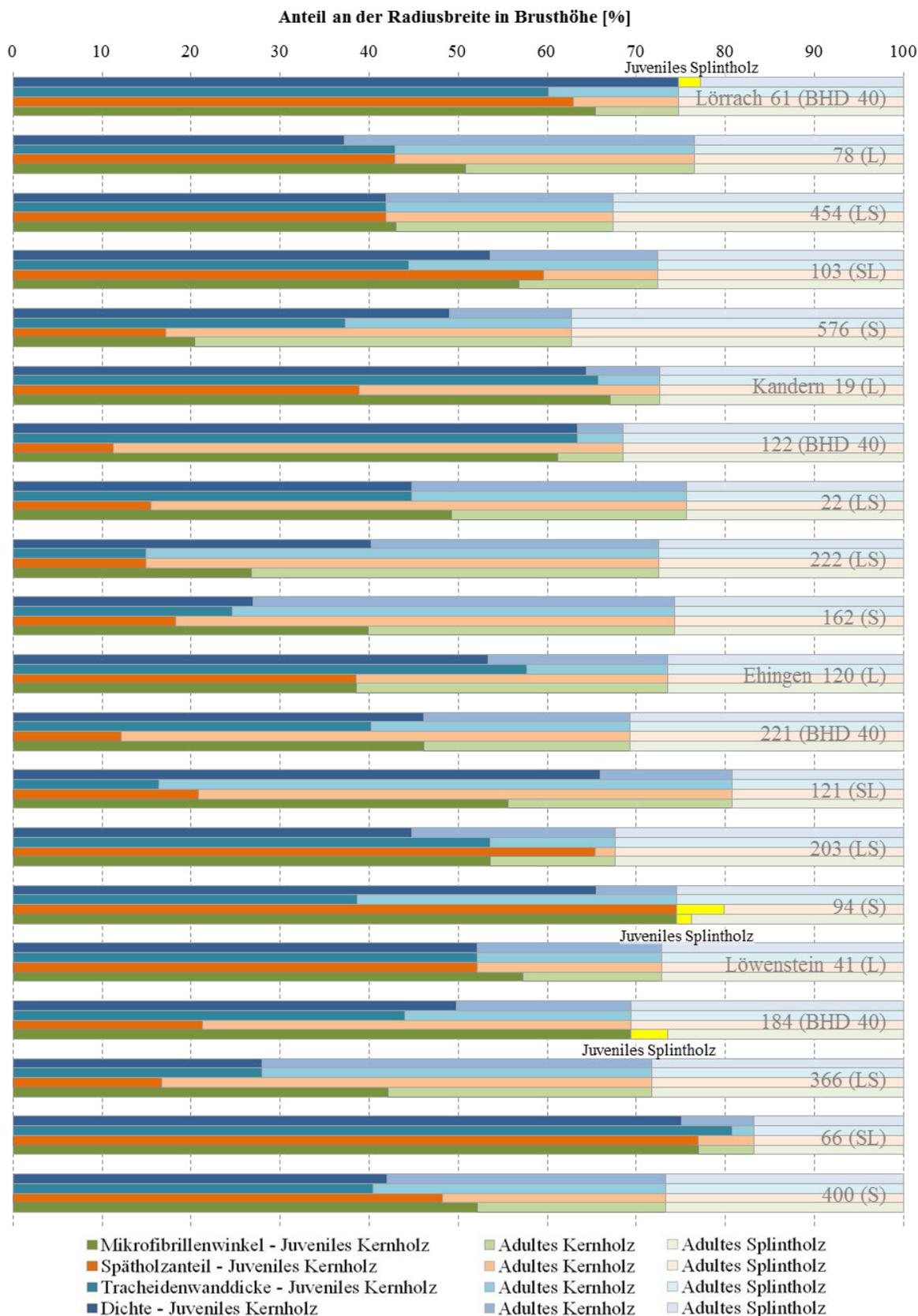


Abbildung 52 Anteil juvenilen bzw. adulten Kern- sowie Splintholzes an der Radiusbreite [%] der 20 untersuchten Bäume ermittelt anhand der Merkmale Rohdichte, Tracheidenwanddicke Spätholzanteil und Mikrofibrillenwinkel.



Werden die Anteile des juvenilen und adulten Holzes an der Radiusbreite in Brusthöhe mit visuell abgegrenzten Kern- und Splintholzanteilen kombiniert, kann wie in Abbildung 52 zusätzlich der praxisrelevante Anteil adulten Kernholzes quantifiziert werden. Dabei wird mittels der Merkmale Spätholzanteil, Mikrofibrillenwinkel und Rohdichte vereinzelt juveniles Holz identifiziert, das noch nicht verkernt ist. Auf Grundlage der ermittelten anatomischen Merkmale und physikalisch-technologischer Kennwerte können in Anlehnung an die entsprechenden Normen bestimmte Eigenschaften juvenilen und adulten Holzes abgeleitet werden, die in Tabelle 26 dargestellt sind. Die ermittelten Kennwerte unterscheiden sich mit Ausnahme der Bruchschlagarbeit konklusiv zwischen juvenilem und adultem Holz, wobei insbesondere langsam gewachsenes adultes Holz eine höhere Qualität aufweist. Anhand eines konklusiven Unterschiedes zwischen den Mikrofibrillenwinkeln juvenilen und adulten Holzes von im Mittel 80 % zeigt dieses Merkmal die höchste Schärfe zur Identifizierung juvenilen Holzes. Als relativ praxistauglicher Indikator zur Abgrenzung juvenilen und adulten Holzes kann die durch den Spätholzanteil und die Tracheidenwanddicke beeinflusste Rohdichte empfohlen werden.

Tabelle 26 Mittelwerte und Standardabweichungen [%] der Eigenschaften des juvenilen und adulten Holzes der 20 untersuchten Bäume.

		Juveniles Holz	Adultes Holz	Verhältnis juvenil/adult	Signifikanz des Unterschiedes
Jahringbreite	[mm]	6,2 ± 38 %	4,8 ± 44 %	1,30	konklusiv
Spätholzanteil	[%]	27 ± 44 %	41 ± 22 %	0,66	konklusiv
Tracheidenlänge	[µm]	2072 ± 30 %	3154 ± 23 %	0,66	konklusiv
Tracheidenwanddicke	[µm]	2,4 ± 38 %	2,8 ± 43 %	0,86	konklusiv
Mikrofibrillenwinkel	[°]	27 ± 33 %	15 ± 53 %	1,80	konklusiv
Rohdichte	[kg/m ³]	470 ± 43 %	526 ± 52 %	0,89	konklusiv
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	42 ± 19 %	50 ± 14 %	0,84	konklusiv
Druck-Elastizitätsmodul	[N/mm ²]	11630 ± 28 %	16035 ± 11 %	0,73	konklusiv
Biegefestigkeit	[N/mm ²]	81 ± 19 %	102 ± 13 %	0,79	konklusiv
Biege-Elastizitätsmodul	[N/mm ²]	9986 ± 22 %	13193 ± 9 %	0,76	konklusiv
Bruchschlagarbeit	[kJ/m ²]	35 ± 43 %	48 ± 27 %	0,73	dezisiv

Die Quellungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften wurden nicht nach juvenilem und adultem Holz, sondern nach innerem und äußerem Kernholz unterschieden. Als qualitätsbeeinflussend ist dabei die im Vergleich zum äußeren Kernholz dezisiv geringe Querschnittsquellung des inneren Kernholzes herauszustellen, die auf relativ große Mikrofibrillenwinkel im juvenilen Holz zurückgeführt wird. Die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen sind von großer praktischer Bedeutung, da das Kernholz der Douglasie stark für den Garten- und Landschaftsbau nachgefragt wird. Für die Versuchsbäume ermittelte hohe Masseverluste durch den Basidiomyceten *P. placenta* führen zu einer Einstufung in Dauerhaftigkeitsklasse 4 (wenig dauerhaft), was bei direkter Bewitterung des Holzes gemäß Gebrauchsklasse 3.2 nach DIN 335 (2013) Maßnahmen des konstruktiven oder vorbeugenden chemischen Holzschutzes erfordert. Werden nur die durch den obligatorischen Basidiomyceten

C. puteana verursachten Masseverluste betrachtet, führt dies zu einer besseren Einstufung in Dauerhaftigkeitsklasse 3 (mäßig dauerhaft). Die Auswahl der Holzzerstörer hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der natürlichen Dauerhaftigkeit. Zusätzlich sind die durch die Basidiomyceten *P. placenta*, *C. puteana* und *C. versicolor* hervorgerufenen Masseverluste im äußeren Kernholz dezisiv niedriger als im inneren Kernholz. Gezielte lichtmikroskopische und UV-spektroskopische Untersuchungen zur Charakterisierung ungleichmäßiger Abbaumuster zeigen, dass sich der Holzabbau durch die Basidiomyceten *P. placenta* und *C. puteana* auf Holzstrahlferne Zonen konzentriert. Ob dies auf die fungizide und/oder hydrophobe Wirkung der vor allem in den Holzstrahlen eingelagerten Extraktstoffe zurückzuführen ist, kann anhand der biochemischen Untersuchungen nicht abschließend geklärt werden. Da das in früheren Untersuchungen mit der höheren Dauerhaftigkeit nordamerikanischer Douglasie in Verbindung gebrachte Taxifolin in relativ uniformer Konzentration gemessen wurde, scheint dieses Flavanonol marginale fungizide Wirkung zu entfalten (RUDMAN 1962).

Der Spätholzanteil des adulten Holzes, die Rohdichte und Druckfestigkeit des juvenilen und adulten Holzes und die Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit sind mit Eigenschaften anderen europäischen Douglasienholzes vergleichbar (POLLET et al. 2013, BAWCOMBE 2012, AUGUSTA 2007, KNIGGE 1958). Alle anderen ermittelten, eher niedrigeren Kennwerte sind auf die praxisunübliche, aber für Forschungszwecke wichtige Anlage von Feldern des Standraumversuches mit 500 Douglasien pro Hektar zurückzuführen, woraus schnell gewachsenes Holz geringerer Qualität resultiert. Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass die Eigenschaften des adulten Holzes den Eigenschaften von *P. abies* zumindest gleichwertig, oder aber besser sind (WAGENFÜHR & SCHEIBER 1985). Diese Befunde decken sich mit früheren Untersuchungen an einheimischem Douglasienholz und bestätigen die guten technologischen Eigenschaften.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsvorhabens wurden grundlegende anatomische, physikalische, mechanische und biochemische Untersuchungen zur Charakterisierung der Holzeigenschaften von juvenilem und adultem Holz der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) aus Standraumversuchen in Baden-Württemberg durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen stand die Fragestellung, welchen Einfluss die waldbauliche Behandlung auf den Anteil und die Eigenschaften des juvenilen und adulten Holzes hat. Die für die Untersuchungen ausgewählten 20 Bäume stammen aus vier verschiedenen Anbaugebieten und waren zum Erntezeitpunkt im Mittel 42 Jahre alt. Diese Bäume bilden die größtmögliche waldbaulich zu rechtfertigende Spanne von Wuchsbedingungen ab und stellen somit ein aussagekräftiges Sortiment dar. Für vergleichende Untersuchungen wurde außerdem Holz von vier etwa 85 Jahre alten Douglasien aus einem der Anbaugebiete hinzugezogen. Im Detail wurden die Merkmale Jahrringbreite, Spätholzanteil, Tracheidenwanddicke, radialer und tangentialer Tracheidendurchmesser, Mikrofibrillenwinkel, Rohdichte und Biege-Elastizitätsmodul in Brusthöhe über die gesamten Radien ermittelt. Zur Bestimmung der Tracheidenlänge sowie der normangelehnten Prüfungen von Druckfestigkeit und Druck-Elastizitätsmodul, Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul, Bruchschlagarbeit, Quellung, und natürlicher Dauerhaftigkeit wurden jeweils Proben aus dem fünften Jahrring und dem äußersten Kernholzjahrring sowie radial in Richtung des Kambiums bzw. des Marks angrenzende Bereiche untersucht. Zur biochemischen Charakterisierung von dauerhaftigkeitsgeprüftem Holz wurden zudem Extraktstoffgehalte, Flavonoidgehalte und relative Ligninkonzentrationen bestimmt.

Die über den gesamten Radius bestimmten Eigenschaften ermöglichen eine Identifizierung des juvenilen und adulten Holzes anhand der vier Merkmale Spätholzanteil, Tracheidenwanddicke, Mikrofibrillenwinkel und Rohdichte mittels segmentierter linearer Regression. Dabei variiert das anhand der jeweiligen Merkmale in Brusthöhe identifizierte mittlere kambiale Alter des Eintritts in die adulte Phase von 18 bis 25 bzw. dem 12. bis 19. Jahrring. Im Vergleich der vier Merkmale zeigt der Spätholzanteil den frühesten Beginn der adulten Holzbildung an, gefolgt von der Tracheidenwanddicke, dem Mikrofibrillenwinkel und der Rohdichte, die den spätesten Beginn anzeigt. Zusätzlich deutet der Zusammenhang zwischen dem Anteil juvenilen Holzes und dem zur Verfügung stehenden Standraum darauf hin, dass kleine Standräume von 2,5 bis 5 m² die frühzeitige Bildung adulten Holzes induzieren können. Hinsichtlich der Eigenschaftsunterschiede zwischen juvenilem und adultem Holz weist das juvenile Holz dezisiv niedrigere Werte auf, die sich negativ auf die Holzverwendung auswirken können – einzig die mittlere Jahrringbreite und der mittlere Mikrofibrillenwinkel sind im juvenilen Holz um 30 bzw. 80 % größer als im adulten Holz. Dagegen ist der mittlere Spätholzanteil im juvenilen Holz um 34 % niedriger als im adulten Holz – desweiteren betragen die Unterschiede zwischen den Tracheidenlängen ebenfalls 34 %, den Tracheidenwanddicken 14 %, den Rohdichten 11 %, den Druckfestigkeiten 16 %, den Druck-Elastizitätsmoduln 27 %, den Biegefestigkeiten 21 %,

den Biege-Elastizitätsmoduln 24 % und den Bruchschlagarbeiten 27 %. Quellungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften wurden nach innerem und äußerem Kernholz unterschieden. Das innere Kernholz weist eine dezisiv geringere Querschnittsquellung auf als das äußere Kernholz, was als positive verwendungsrelevante Eigenschaft zu bewerten ist. Für das gesamte geprüfte Holz wird gemäß DIN 350-1 (1994) eine geringe natürliche Dauerhaftigkeit festgestellt, wobei drei von vier Basidiomyceten am inneren Kernholz dezisiv höhere Masseverluste verursachen. Die Ursachen der geringen natürlichen Dauerhaftigkeit konnten nicht abschließend ermittelt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass nur der Spätholzanteil des adulten Holzes, die Dichte und Druckfestigkeit des juvenilen und adulten Holzes sowie die natürliche Dauerhaftigkeit den bisher ermittelten Eigenschaften des Holzes europäischer Douglasie ähneln. Alle anderen Eigenschaften nehmen niedrigere Werte an, was auf die eher für Forschungszwecke geeignete Zusammenstellung des heterogenen Sortimentes zurückzuführen ist. Insgesamt liegen die für die untersuchten Bäume ermittelten Holzeigenschaften über den Kennwerten der Fichte (*Picea abies* (L.) H. Karst.)

7 Abstract

Interdisciplinary investigations on the anatomical, physical, mechanical and biochemical properties aim at a more detailed characterisation of juvenile and adult wood of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) trees from scientifically arranged spacing experiments on sites in Southern Germany. Studies focussed on the influence of varying silvicultural regimes on shares and properties of juvenile and adult wood. At harvesting, the 20 selected experimental trees were on average 42 years old. These trees represent the widest span of legitimate silvicultural regimes and therefore depict a meaningful heterogeneous assortment. For comparison, some additional investigations were carried out with portions of four approximately 85 years old trees from one of the sites. In detail, growth ring width, latewood percentage, tracheid wall thickness, radial and tangential tracheid diameter, microfibril angle, density, and static bending modulus of elasticity were investigated for the entire breast height radii. For determination of tracheid length as well as standard based determination of compression strength and compression modulus of elasticity, bending strength and bending modulus of elasticity, impact bending strength, swelling and natural durability, sampling comprised the fifth growth ring and the outermost growth ring of the heartwood with adjacent zones. Biochemical characterisation covered extractive contents, flavonoid contents and relative lignin concentrations.

Properties recorded from pith to bark permit the identification of juvenile and adult wood by traits latewood percentage, tracheid wall thickness, microfibril angle and density using segmented linear regression. Between traits, identified cambial ages vary from 18 to 25 resp. the 12th to 19th growth ring at breast height. In comparison of initial adult wood formation, wood trait latewood percentage shows earliest cambial ages, followed by tracheid wall thickness, microfibril angle and density. Additionally, relationships between given spacings and juvenile wood shares indicate that small spacings like 2.5 and 5 m² induce early formation of adult wood. Regarding wood property differences, juvenile wood showed decisive lower values as compared to adult wood which might negatively affect wood processing. Average growth ring width and microfibril angle of juvenile wood are about 30 resp. 80 % wider than in adult wood. Contrary, average latewood percentage in juvenile wood is approximately 34 % lower than in adult wood. Furthermore, differences between tracheid lengths are also 34 %, between tracheid wall thicknesses 14 %, between densities 11 %, between compression strengths 16 %, between compression modulus of elasticity 27 %, between bending strength 21 %, between bending modulus of elasticity 24 %, and between impact bending strength 27 %. Swelling properties and natural durability were not differentiated between juvenile and adult wood, but for inner and outer heartwood. Inner heartwood swells decisively less as compared to outer heartwood, which can be regarded as a positive quality feature for wood processing. All wood portions tested for natural durability were referred to as less durable according to DIN 350-1 (1994), while three of four basidiomycetes caused decisively higher mass losses in the inner heartwood. Reasons for such low natural durability could not be completely explained.

The results obtained showed that latewood percentage of adult wood, compression strength and

density of juvenile and adult wood as well as natural durability are similar to properties of European Douglas-fir reported in earlier studies. All other properties exhibit lower values, which might be consequence of a rather heterogeneous assortment of wood collected under scientific aspects. When compared to wood properties of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) wood, the properties of studied Douglas-fir trees generally had higher values.

Keywords: Douglas-fir, wood quality, properties, juvenile wood, adult wood

8 Literaturverzeichnis

- ABDEL-GADIR, A. Y. & KRAHMER, R. L. (1993a): Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir. *Wood and Fiber Science* 25: (3) 242–249.
- ABDEL-GADIR, A. Y. & KRAHMER, R. L. (1993b): Genetic variation in the age of demarcation between juvenile and mature wood of Douglas fir. *Wood and Fiber Science* 25: (4) 384–394.
- ABETZ, P. (1971): Douglasien-Standraumversuche. *Allgemeine Forst Zeitschrift* 26: 448–449.
- AGRAR HEUTE (24.04.2012): Douglasien ausgerissen: Staatsforsten zeigt Greenpeace an. *Agrar heute*.
- AKHTER, S. & HALE, M. D. C. (2002a): Variation in durability of British grown Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Part I. Effect of density and growth rate, Stockholm, Sweden: The International Research Group on Wood Preservation.
- AKHTER, S. & HALE, M. D. C. (2002b): Variation in durability of British grown Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Part II. Effect of extractive contents and taxifolin, Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation.
- ALBRECHT, A.; KOHNLE, U.; HANEWINKEL, M.; BAUHUS, J. (2011): Sturmrisiko von Fichte versus Douglasie auf baden-württembergischen Versuchsflächen. In: Nagel, J. (Hrsg.): Tagungsband zur Jahrestagung 2011 der Sektion Ertragskunde im DVFFA. Cottbus, Seiten 21–31.
- ALTEYRAC, J.; CLOUTIER, A.; ZHANG, S. Y. (2006): Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights. *Wood Science and Technology* 40: 124–138.
- ANDERSON, E. A. (1951): Tracheid length variation in conifers as related to distance from pith. *Journal of Forestry* 49: (5) 38–42.
- ANIOL, R. W. (1983): Tree ring analysis using Catras. *Dendrochronologia* 1: 45–53.
- ANIOL, R. W. (1987): A new device for computer assisted measurement of tree-ring widths. *Dendrochronologia* 5: 135–141.
- AUGUSTA, U. (2007): Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich, Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg.
- BAILEY, I. W. (1920): The cambium and its derivative tissues. II. Size variations of cambial initials in gymnosperms and angiosperms. *American Journal of Botany* 355–367.
- BANNAN, M. W. (1967): Anticlinal divisions and cell length in conifer cambium. *Forest Products Journal* 17: (6) 63–69.
- BÄR, L. (2009a): Beurteilung des Naturverjüngungspotenzials der Douglasie. *Allgemeine Forst Zeitschrift-Der Wald* 64: (11) 578–580.

- BÄR, L. (2009b): Perspektiven für den Douglasienanbau im Pfälzerwald. *Allgemeine Forst Zeitschrift-Der Wald* 64: (11) 581–583.
- BARBER, N. F. & MEYLAN, B. A. (1964): The anisotropic shrinkage of wood - A theoretical model. *Holzforschung* 18: (5) 146–156.
- BARNETT, J. R. & BONHAM, V. A. (2004): Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews* 79: 461–472.
- BARONIUS, K. & FIEDLER, H. J. (1996): Ernährungszustand der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) auf dänischen und deutschen Standorten im Vergleich zu ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 115: 10–16.
- BARRETT, J. D. & KELLOGG, R. M. (1991): Bending strength and stiffness of second-growth Douglas-fir dimension lumber. *Forest Products Journal* 41: (10) 35–43.
- BAUCH, J.; SEEHANN, G.; FITZNER, H. (1975): Microspectrophotometrical investigations on lignin of decayed wood. In: Becker, G.; Liese, W. (Hrsg.): Organismen und Holz. Berlin: Duncker & Humblot, Seiten 141–152.
- BAWCOMBE, J. (2012): A study of Douglas-fir anatomical and mechanical properties and their interactions, Dissertation. University of Bath, Bath.
- BAWCOMBE, J.; HARRIS, R.; WALKER, P.; ANSELL, M. (2010): A multidisciplinary study assessing the properties of Douglas-fir grown in the south west region of the United Kingdom, Riva del Garda: World Conference on Timber Engineering 2010.
- BENDTSEN, B. A. (1978): Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal* 28: (10) 61–72.
- BIÉVELET, C.; HENIN, J. M.; JOUREZ, B.; HEBERT, J.; LECOMTE, H. (2007): Le douglas en région wallonne, état des lieux et tendances. *Forêt Wallonne*: (90) 27–39.
- BISSET, I. J. W. & DADSWELL, H. E. (1950): The variation in cell length within one growth ring of certain angiosperms and gymnosperms. *Australian Forestry* 14: (1) 17–29.
- BLOHM, J. H.; EVANS, R.; KOCH, G.; SCHMITT, U.: Identification and characterisation of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) juvenile and adult wood grown in Southern Germany. *Drewno (Wood)*, in review.
- BLOHM, J. H.; KOCH, G.; MELCHER, E.; SAAKE, B.; SCHMITT, U. (2014a): Biochemistry of Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) heartwood grown in Southern Germany. In: Wilson, P. (Hrsg.): Proceedings of the 10th Meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE). Edinburgh, Scotland: Edinburgh Napier University. Seite 226.

- BLOHM, J. H.; MELCHER, E.; LENZ, M. T.; KOCH, G.; SCHMITT, U. (2013): Natural durability of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) heartwood grown in Southern Germany. In: Brischke, C.; Meyer, L. (Hrsg.): Proceedings of the 9th Meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE). Hannover, Germany: Leibniz Universität. Seiten 17–22.
- BLOHM, J. H.; MELCHER, E.; LENZ, M. T.; KOCH, G.; SCHMITT, U. (2014b): Natural durability of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) heartwood grown in southern Germany. *Wood Material Science & Engineering* 9: (3) 186–191.
- BORMANN, B. T. (1984): Douglas-Fir an American wood: USDA Forest Service, Washington, DC.
- BUSING, R. T. & GARMAN, S. L. (2002): Promoting old-growth characteristics and long-term wood production in Douglas-fir forests. *Forest Ecology and Management* 160: 161–175.
- COWN, D. J. (1976): Densitometric studies on the wood of young coastal douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), Dissertation. University of British Columbia, Vancouver B.C.
- CSERJESI, A. J. (1969): Toxicity and biodegradation of dihydroquerecetin. *Canadian Journal of Microbiology* 15: 1137–1140.
- CURLING, S. F.; CLAUSEN, C. A.; WINANDY, J. E. (2002): Relationships between mechanical properties, weight loss and chemical composition of wood during incipient brown-rot decay. *Forest Products Journal* 52: (7/8) 34–39.
- DANCKELMANN, B. (1884): Anbauversuche mit ausländischen Holzarten in den Preußischen Staatsforsten. *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* 6/7: 289-315 & 345-371.
- DE KORT, I. (1990): Tracheid length in vital and non vital douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in the netherlands. *IAWA Bulletin n.s.* 11: (2) 203–209.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 338 (2010): Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen, Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 52184 (1979): Bestimmung der Quellung und Schwindung., Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 335 (2013): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten, Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 350-1 (1994): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz., Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 350-2 (1994): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Teil 2: Leitfaden für die natürliche

- Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa, Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 6798 (1988): Fächerscheiben, Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 113 (1996/prA1 2003): Holzschutzmittel. Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzerstörende Basidiomyceten. Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit., Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 52185 (1976): Prüfung von Holz - Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser., Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 52186 (1978): Prüfung von Holz - Biegeversuch., Berlin: Beuth.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 52189 (1981): Prüfung von Holz - Schlagbiegeversuch. Bestimmung der Bruchschlagarbeit.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 4074-1 (2003): Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit. Teil 1: Nadelschnittholz., Berlin: Beuth.
- DI LUCCA, C. (1987): Juvenile-mature wood transition in second-growth coastal Douglas-fir, Dissertation. University of British Columbia, Vancouver B.C.
- DI LUCCA, C. (1989): Juvenile-mature wood transition. Kellogg, R. M., Vancouver B.C.: Forintek Canada Corp.
- DIMOCK II, E. J. & HASKELL, H. H. (1962): Veneer grade yield from pruned Douglas fir: USDA Forest Service, Portland, Oregon.
- DÜNISCH, O. (1993): Über die Bedeutung der Elementversorgung von Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) für die Holzbildung, Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg.
- DÜNISCH, O.; RICHTER, H. G.; KOCH, G. (2009): Wood properties of juvenile and mature heartwood in *Robinia pseudoacacia* L. *Wood Science and Technology* 44: 301–313.
- EHRING, A. (2005): Der Douglasien-Standraumversuch. *Berichte Freiburger Forstlicher Forschung*: (60) 27–35.
- ERICKSON, H. D. & ARIMA, T. (1974): Douglas-fir wood quality studies. *Wood Science and Technology* 8: 255–265.
- ERICKSON, H. D. & HARRISON, A. T. (1974): Douglas-fir wood quality studies. *Wood Science and Technology* 8: 207–226.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN/TS 15063 (2005): Durability of wood and wood-based products - Determination of the natural durability of a solid wood against wood-

- destroying fungi, test methods - Part 1: Basidiomycetes, Brussels: European Committee for Standardization.
- EVANS, R. (2009): SilviScan™ rapid wood analysis: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Canberra.
- EVANS, R. (2014): Applications of SilviScan 2014. Präsentation: Zentrum Holzwirtschaft der Universität Hamburg / Thünen Institut für Holzforschung, Hamburg.
- EVANS, R. (18.04.2015): Silvican-3 measurements, e-Mail.
- EVANS, R. & ILIC, J. (2001): Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *Forest Products Journal* 51: (3) 53–57.
- EXNER, U. (19.10.2014): Wenn Bäume in Deutschland diskriminiert werden. *Die Welt*.
- FABRIS, S. (2000): Influence of cambial ageing, initial spacing, stem taper and growth rate on the wood quality of three coastal conifers, Dissertation. University of British Columbia, Vancouver B.C.
- FENGEL, D. & STOLL, M. (1973): Über die Veränderungen des Zellquerschnitts, der Dicke der Zellwand und der Wandschichten von Fichtenholz-Tracheiden innerhalb eines Jahrringes. *Holzforschung* 27: (1) 1–7.
- FERGUS, B. J.; PROCTER, A. R.; GORING, D. A. I. (1969): The distribution of lignin in sprucewood as determined by ultraviolet microscopy. *Wood Science and Technology* 3: 117–138.
- FERRON, J. L. (2010): Douglas-fir in France: history, recent economic development, overviews for the future. In: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg & Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Opportunities and risks for Douglas fir in a changing climate. Freiburg.
- FISCHER, H. W. (1994): Untersuchung der Qualitätseigenschaften, insbesondere der Festigkeit von Douglasien-Schnittholz (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) aus nicht-wertgeästeten Stämmen, Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.
- FLÖHR, W. (1958): Kennzeichnung, Varietäten und Verbreitung der Douglasie. In: Göhre, K. (Hrsg.): Die Douglasie und ihr Holz. Berlin: Akademie-Verlag.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY (1999): Wood handbook - Wood as an engineering material: USDA Forest Service, Madison, WI.
- FRANKLIN, G. L. (1945): Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature* 155: (3924) 51.

- FRANKLIN, J. F. & SPIES, T. A. (1983): Characteristics of old-growth Douglas-fir forests. In: Society of American Foresters (Hrsg.): Society of American Foresters National Convention Proceedings. Washington, DC, Seiten 328–334.
- GAEBELER, J. (1981): Die Douglasie - Probleme, Hoffnungen und Gefahren. *Holz-Zentralblatt* 107: 1959–1961.
- GARDNER, J. A. F. & BARTON, G. M. (1960): The distribution of Dihydroquercetin in Douglas-fir and Western Larch. *Forest Products Journal* 10: (3) 171–173.
- GARTNER, B. L.; MORRELL, J. J.; FREITAG, C. M.; SPICER, R. (1999): Heartwood decay resistance by vertical and radial position in Douglas -fir trees from a young stand. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1993–1996.
- GARTNER, B. L.; NORTH, E. M.; JOHNSON, G. R.; SINGLETON, R. (2002): Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 439–447.
- GARTNER, B. L.; ROBBINS, J. M.; NEWTON, M. (2005): Effects of pruning on wood density and tracheid length in young Douglas-fir. *Wood and Fiber Science* 37: (2) 304–313.
- GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R.; BULIGON, E. A.; CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; DE MELO, R. R.; TREVISAN, R.; SANTINI, E. J. (2010): Estimativa da idade de segregação do lenho juvenil e adulto de *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch por meio de parâmetros anatômicos da madeira. *Ciência Florestal* 20: (4) 675–682.
- GERHARDS, C. C. (1979): Effect of high-temperature drying on tensile strength of Douglas-fir 2 by 4's. *Forest Products Journal* 29: (3) 39–46.
- GERRY, E. (1916): Fiber measurement studies: a comparison of tracheid dimensions in longleaf pine and douglas fir, with data on the strength and length, mean diameter and thickness of wall of the tracheids. *Science* 43: (1106) 360.
- GÖHRE, K. (1958): Die Douglasie und ihr Holz. In: Göhre, K. (Hrsg.): Die Douglasie und ihr Holz. Berlin: Akademie-Verlag.
- GRAHAM, H. M. & KURTH, E. F. (1949): Constituents of extractives from Douglas Fir. *Industrial & Engineering Chemistry* 41: (2) 409–414.
- GROSSER, D. & TEETZ, W. (1998): Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung): Holzabsatzfond - Absatzförderungsfonds der deutschen Forstwirtschaft, Bonn.
- GROTTA, A. T.; LEICHTL, R. J.; GARTNER, B. L.; JOHNSON, G. R. (2005): Effect of growth ring orientation and placement of earlywood and latewood on MOE and MOR of very-small clear Douglas-fir beams. *Wood and Fiber Science* 37: (2) 207–212.

- HALE, J. D. (1957): The anatomical basis of dimensional changes of wood in response to changes in moisture content. *Forest Products Journal* 7: (4) 140–144.
- HANCOCK, W. V. (1957): The distribution of dihydroquercetin and a leucoanthocyanidin in a Douglas-fir tree. *Forest Products Journal* 7: 335–338.
- HAPLA, F. (1981): Untersuchung der Auswirkung verschiedener Pflanzverbandsweiten auf die Holzeigenschaften der Douglasie. *Forstarchiv* 52: 134-143+186-190.
- HAPLA, F. (1985): Radiographisch-densitometrische Holzeigenschaftsuntersuchungen an Douglasien aus unterschiedlich durchforsteten Versuchsflächen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 43: (1) 9–15.
- HAPLA, F. (1986): Einfluß von Rohdichte und Jahrringbreite auf Biege- und Druckfestigkeit von Douglasie. *Holz als Roh- und Werkstoff* 44: (1) 36.
- HAPLA, F. (1996): Die Tracheidenlänge junger Douglasien unterschiedlicher soziologischer Baumklassen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 54: (5) 320.
- HAPLA, F. & SABOROWSKI, J. (1987): Stichprobenplanung für holzanatomische Untersuchungen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 45: 141–144.
- HARTARD, B. & SCHRAMM, E. (2009): Biodiversität und Klimawandel in der Debatte um den ökologischen Waldumbau - eine Diskursfeldanalyse. LOEWE Biodiversität und Klima Forschungszentrum (BiKF), Frankfurt am Main.
- 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.
- HEIN, S.; WEISKITTEL, A. R.; KOHNLE, U. (2008): Branch characteristics of widely spaced Douglas-fir in south-western Germany: Comparisons of modelling approaches and geographic regions. *Forest Ecology and Management* 256: 1064–1079.
- HERMANN, R. K. & LAVENDER, D. P. (1990): Douglas-Fir. In: Burns, R. M.; Honkala, B. H. (Hrsg.): *Silvics of North America*. Washington, DC: Forest Service U.S.D.A.
- HERMANN, R. K. & LAVENDER, D. P. (1999): Douglas-fir planted forests. *New Forests* 17: 53–70.
- HEWICKER, J. A. (23.01.2014): Ausschluss der finanziellen Förderung von Douglasienbeständen in Niedersachsen, mündlich.
- HILLIS, W. E. (1987): *Heartwood and tree exudates*: Springer, Berlin.
- HUCKFELDT, T. & SCHMIDT, O. (2015): *Hausfäule- und Bauholzpilze*: Rudolf Müller, Köln.
- ILIC, J.; NORTHWAY, R.; PONGRACIC, S. (2003): *Juvenile wood characteristics, effects and identification*: Forest and Wood Products Research and Development Corporation, Victoria.

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 3696 (1987): Water for analytical laboratory use - Specification and test methods, Geneva, Switzerland.
- IRBE, I.; NOLDT, G.; KOCH, G.; ANDERSONE, I.; ANDERSONS, B. (2006): Application of scanning UV microspectrophotometry for the topochemical detection of lignin within individual cell walls of brown-rotted Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood. *Holzforschung* 60: 601–607.
- JAHN, G. (1955): Gegenüberstellung deutscher und amerikanischer Douglasien Provenienzversuche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 126: 68–76.
- JARQUE, C. M. & BERA, A. K. (1980): Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Economics Letters* 6: 255–259.
- JOZSA, L. A. & MIDDLETON, G. R. (1994): A discussion of wood quality attributes and their practical implications: Forintek Canada Corp., Vancouver, B.C.
- KARLSSON, L.; MÖRLING, T.; BERGSTEN, U. (2013): Influence of silvicultural regimes on the volume and proportion of juvenile and mature wood in boreal Scots pine. *Silva Fennica* 47: (4) 1–17.
- KECKES, J.; BURGERT, I.; LICHTENEGGER, H.; REITERER, A.; STANZL-TSCHEGG, S.; FRATZL, P. (2004): Microfibril angle in wood: characterisation using x-ray scattering and influence on mechanical properties. In: Schmitt, U.; Ander, P.; Barnett, J. R.; Emons, A. M. C.; Jeronimidis, G.; Saranpää, P.; Tschegg, S. (Hrsg.): Wood fibre cell walls. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Seiten 189–202.
- KENK, G. & HRADEZKY, J. (1984): Behandlung und Wachstum der Douglasien in Baden-Württemberg: Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg, Freiburg.
- KENK, G. & THREN, M. (1984): Ergebnisse verschiedener Douglasienprovenienzversuche in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 155: (7/8) 165–184.
- KENK, G. & WEISE, U. (1983): Erste Ergebnisse von Douglasien-Pflanzverbandsversuchen in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 154: (3) 41–55.
- KENNEDY, R. W. (1956): Fungicidal toxicity of certain extraneous components in Douglas-fir heartwood. *Forest Products Journal* 6: (2) 80–84.
- KLÄDTKE, J.; KOHNLE, U.; KUBLIN, E.; EHRING, A.; PRETZSCH, H.; UHL, E.; SPELLMANN, H.; WELLER, A. (2012): Wachstum und Wertleistung der Douglasie in Abhängigkeit von der Standraumgestaltung. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 163: (3) 96–104.
- KNIGGE, W. (1958): Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Holzeigenschaften und Wuchs der Gastbaumart Douglasie (*Pseudotsuga taxifolia* Britt.): J. D. Sauerländer's, Frankfurt am Main.

- KNOERZER, D. (1999): Zur Einbürgerungstendenz der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco) im Schwarzwald. *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz* 8: 31–39.
- KOHNLE, U. & EHRING, A. (2008): Stand des koordinierten Douglasien-Standraumversuches in Baden-Württemberg. In: Schmidt, O. (Hrsg.): Die Douglasie - Perspektiven im Klimawandel. Freising, Seiten 49–59.
- KÖLLING, C. (2008): Die Douglasie im Klimawandel: Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. In: Schmidt, O. (Hrsg.): Die Douglasie - Perspektiven im Klimawandel. Freising, Seiten 12–21.
- KOLLMANN, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit: Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- KRAHMER, R. L. (1961): Anatomical features of permeable and refractory Douglas-fir. *Forest Products Journal* 11: 439–441.
- KRAMER, H. & SMITH, J. H. G. (1985): Bestandesbegründung der Douglasie in Britisch-Kolumbien, Kanada. *Forstarchiv* 56: 9–13.
- KROIHER, F. (17.07.2003): Vorkommen und Baumartenanteile von Douglasien auf Stichprobenpunkten der BWI², Digitales Bild.
- KRUSKAL, W. H. & WALLIS, W. A. (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47: (260) 583–621.
- KUČERA, B. (1994): A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce. *Wood and Fiber Science* 26: (1) 152–167.
- LACHENBRUCH, B.; JOHNSON, G. R.; DOWNES, G. M.; EVANS, R. (2010): Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 55–64.
- LAI, Y. F.; HELM, R.; KARCHESY, J. (1992): [5',5']-bisdihydroquercetin: A B-ring linked biflavonoid from *Pseudotsuga menziesii*. *The International Journal of Plant Biochemistry* 31: (4) 1444–1445.
- LANGUM, C. E.; YADAMA, V.; LOWELL, E. C. (2009): Physical and mechanical properties of young-growth Douglas-fir and Western Hemlock from western Washington. *Forest Products Journal* 59: (11/12) 37–47.
- LARSON, P. R.; KRETSCHMANN, D. E.; CLARK, A., III; ISEBRANDS, J. G. (2001): Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis, Madison, WI.
- LEE, H. N. & SMITH, E. M. (1916): Douglas fir fiber with special reference to length. *Forestry Quarterly* 14: (4) 671–695.

- LICHTENEGGER, H.; REITERER, A.; STANZL-TSCHEGG, S.; FRATZL, P. (1999): Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods - A possible strategy of mechanical optimization. *Journal of Structural Biology* 128: 257–269.
- LIESE, J. (1936): Die Douglasienrassen und ihre Anfälligkeit gegenüber Douglasiennadelschütte (Rhabdocline pseudotsugae). *Mitteilungen der deutschen dendrologischen Gesellschaft* 48: 259–264.
- LINDSTRÖM, H.; EVANS, J. W.; VERRILL, S. P. (1998): Influence of cambial age and growth conditions on microfibril angle in young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Holzforschung* 52: (6) 573–581.
- LITTLEFORD, T. W. (1961): Variation of strength properties within trees and between trees in a stand of rapid-growth douglas fir: Forest Products Laboratories of Canada, Vancouver, B.C.
- LORENZ, R. J. (1988): Grundbegriffe der Biometrie: Gustav Fischer, Stuttgart, New York.
- MALTERUD, K. E.; BREMNES, T. E.; FAEGRI, A.; MOE, T.; SANDANGER DUGSTAD, E. K.; ANTHONSEN, T.; HENRIKSEN, L. M. (1985): Flavonoids from the wood of *Salix caprea* as inhibitors of wood-destroying fungi 48: (4) 559–563.
- MANSFIELD, S. D.; PARISH, R.; DI LUCCA, C.; GOUDIE, J.; KANG, K. Y.; OTT, P. (2009): Revisiting the transition between juvenile and mature wood: a comparison of fibre length, microfibril angle and relative wood density in lodgepole pine. *Holzforschung* 63: 449–456.
- MARTINEZ, D.; CHALLACOMBE, J.; MORGENSTERN, I.; HIBBETT, D.; SCHMOLL, M.; KUBICEK, C. P.; FERREIRA, P.; RUIZ-DUENAS, F. J.; MARTINEZ, A. T.; KERSTEN, P.; HAMMEL, K. E.; Wymelenberg, A. V., Gaskell, J.; LINDQUIST, E.; SABAT, G.; BONDURANT, S. S.; LARRONDO, L. F.; CANESSA, P.; VICUNA, R.; YADAV, R.; DODDAPANENI, H.; SUBRAMANIAN, V.; PISABARRO, A. G.; LAVÍN, J. L.; OGUIZA, J. A.; MASTER, E.; HENRISSAT, B.; COUTINHO, P. M.; HARRIS, P.; MAGNUSON, J. K.; BAKER, S. E.; BRUNO, K.; KENEALY, W.; HOEGGER, P. J.; KÜES, U.; RAMAIYA, P.; LUCAS, S.; SALAMOV, A.; SHAPIRO, H.; TU, H.; CHEE, C. L.; MISRA, M.; XIE, G.; TETER, S.; YAVAR, D.; JAMES, T.; MOKREJS, M.; POSPISEK, M.; GRIGORIEV, I. V.; BRETTIN, T.; ROKHSAR, D.; BERKA, R.; CULLEN, D. (2009): Genome, transcriptome, and secretome analysis of wood decay fungus *Postia placenta* supports unique mechanisms of lignocellulose conversion. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: (6) 1954–1959.
- MCKIMMY, M. D. (1959): Factors related to variation of specific gravity in young-growth Douglas fir: Forest Products Research Center, Corvallis, Oregon.
- MCKIMMY, M. D. (1966): A variation and heritability study of wood specific gravity in 46-year-old Douglas -fir from known seed sources. *Tappi* 49: (12) 542–549.

- MEGRAW, R. A. (1986): Douglas-fir wood properties. In: Oliver, C. D.; Hanley, D. P.; Johnson, J. A. (Hrsg.): Proceedings, Symposium on Douglas-fir stand management for the future. Seattle, WA, Seiten 81–95.
- MEYER, P. (2011): Naturschutzfachliche Bewertung der Douglasie. *Forstarchiv* 82: (157-158).
- MILLER, D. A. (1966): 'Significant' and 'highly significant'. *Nature* 210: 1190.
- MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LÄNDLICHEN RAUM (14. 01. 2009): Stellungnahme - Auch im Klimawandel auf einheimische Baumarten setzen. Drucksache, Landtag von Baden-Württemberg.
- MITCHELL, M. D. & DENNE, M. P. (1997): Variation in density of *Picea sitchensis* in relation to within-tree trends in tracheid diameter and wall thickness. *Forestry* 70: (1) 47–60.
- MÖHLER, K. & BEYERSDORFER, P. (1987): Festigkeitsuntersuchungen an einheimischem Douglasienholz als Bauholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 45: 49–58.
- MOOSMAYER, H. U. (1977): Zur regionalen waldbaulichen Planung in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst Zeitschrift* 32: 504–509.
- NAWROT, M.; PAZDROWSKI, W.; SZYMAŃSKI, M.; JĘDRASZAK, A.; WALKOWIAK, R.; BORYSIK, S. (2012): Identification of juvenile and mature wood zones in stems of European larch (*Larix decidua* Mill.) using a K-means algorithm. *Wood Research* 57: (4) 545–560.
- NEHRING, S.; KOWARIK, I.; RABITSCH, W.; ESSL, F. (2013): Naturschutzfachliche Invasivitätsbewertungen für in Deutschland wild lebende gebietsfremde Gefäßpflanzen: BfN Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- NEWTON, M.; LACHENBRUCH, B.; ROBBINS, J. M.; COLE, E. C. (2012): Branch diameter and longevity linked to plantation spacing and rectangularity in young Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 266: 75–82.
- NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG (05.09.2014a): Wie geht es weiter mit der Forstförderung in Niedersachsen? Kleine Anfrage zur schriftlichen Beantwortung. Präsentation: Ingrid Klopp und Jens Nacke (CDU), Drucksache 17/1942.
- NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG (30.10.2014b): Die Douglasie - „Fremder Baum“ oder „Baum der Zukunft“? Kleine Anfrage zur schriftlichen Beantwortung. Präsentation: Frank Oesterhelweg (CDU), Drucksache 17/2279.
- NIEDERSÄCHSISCHER LANDTAG (09.12.2014c): Förderung forstwirtschaftlicher Maßnahmen sinnvoll gestalten. Antrag. Präsentation: Fraktion der CDU, Drucksache 17/2497.

- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2004): Langfristige ökologische Waldentwicklung. Richtlinie zur Baumartenwahl, Aus dem Walde 54.
- OELKER, M. & RICHTER, H. G. (2006): macroHolzdata: Holzfachschule Bad Wildungen.
- OLD-GROWTH DEFINITION TASK GROUP (1986): Interim definitions for old-growth Douglas-fir and mixed-conifer forests in the Pacific Northwest and California. United States Department of Agriculture: Forest Service.
- OSWALT, S. N.; SMITH, W. B.; MILES, P. D.; PUGH, S. A. (2014): Forest Resources of the United States, 2012: A technical document supporting the Forest Service 2015 update of the RPA Assessment. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office, Washington, DC.
- PANSHIN, A. J. & DE ZEEUW, C. (1980): Textbook of wood technology, Fourth Edition: McGraw-Hill, New York.
- PAUL, B. H. (1960): The juvenile core in conifers. *Tappi* 43: (1) 1–2.
- PAUL, B. H. (1963): The application of silviculture in controlling the specific gravity of wood: USDA Forest Service, Washington, DC.
- PECHMANN, H. v. (1963): Über die Holzeigenschaften einiger fremdländischer Gastbaumarten. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 82: (11) 343–359.
- PECHMANN, H. v. & COURTOIS, H. (1970): Untersuchungen über die Holzeigenschaften von Douglasien aus linksrheinischen Anbaugebieten. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 89: 89–122.
- PETERSON, M. G.; DIETTERICH, H. R.; LACHENBRUCH, B. (2007): Do Douglas-fir branches and roots have juvenile wood? *Wood and Fiber Science* 39: (4) 651–660.
- PHILIPSON, W. R. & BUTTERFIELD, B. G. (1968): A theory on the causes of size variation in wood elements. *Phytomorphology* 17: 155–159.
- POLLET, C.; HENIN, J. M.; HEBERT, J.; JOUREZ, B. (2012): Effect of growth rate on the natural durability of Douglas-fir in western Europe, Stockholm: The International Research Group on Wood Protection.
- POLLET, C.; HENIN, J. M.; JOUREZ, B.; HEBERT, J. (2013): Impact of growth rate on the mechanical properties of Douglas-fir grown in Wallonia (Southern Belgium). IUFRO, Nancy: Measurement methods and modelling approaches for predicting desirable future wood properties.

- POLMAN, J. E. & MILITZ, H. (1996): Wood quality of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) from three stands in the Netherlands. *Annales des Sciences Forestieres* 53: (6) 1127–1136.
- RACZKOWSKI, J. (1963): The toughness of early wood and late wood from Douglas fir of Polish Origin. *Holzforschung* 17: (6) 189–190.
- RAHAYU, I.; DARMAWAN, W.; NUGROHO, N.; NANDIKA, D.; MARCHAL, R. (2014): Demarcation point between juvenile and mature wood in Sengon (*Falcataria moluccana*) and Jabon (*Anthocephalus cadamba*). *Journal of Tropical Forest Science* 26: (3) 331–339.
- RAPP, A. O.; AUGUSTA, U.; BRANDT, K.; MELCHER, E. (2010): Natürliche Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten. Ergebnisse aus acht Jahren Feldversuch. Wiener Holzschutztag, Wien, Austria, S. 43–49.
- RAPP, A. O. & PEEK, R. D. (1999): Melaminharzimprägniertes sowie mit Wetterschutzlasur oberflächenbehandeltes und unbehandeltes Vollholz während zweijähriger Freilandbewitterung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57: 331–339.
- RATHGEBER, C. B. K.; DECOUX, V.; LEBAN, J. M. (2006): Linking intra-tree-ring wood density variations and tracheid anatomical characteristics in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Annals of Forest Science* 63: 699–706.
- REHBEIN, M. & KOCH, G. (2010): Wie dauerhaft ist die Sibirische Lärche? *Holz-Zentralblatt* 136: (34) 847–848.
- REHBEIN, M. & KOCH, G. (2011): Topochemical investigation of early stages of lignin modification within individual cell wall layers of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood infected by the brown-rot fungus *Antrodia vaillantii* (DC.: Fr.) Ryv. *International Biodeterioration & Biodegradation* 65: 913–920.
- REIF, A.; BRUCKER, U.; KRATZER, R.; SCHMIEDINGER, A.; BAUHUS, J. (2009): Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes: Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn.
- RENDELE, B. J. (1959): Fast-grown coniferous timber - some anatomical considerations. *Quarterly Journal of Forestry* 116–122.
- RENDELE, B. J. (1960): Juvenile and adult wood. *The Journal of the Institute of Wood Science*: (5) 58–61.
- RUDMAN, P. (1962): The causes of natural durability in timber. *Holzforschung* 16: (3) 74–77.
- RUDMAN, P. (1963): The causes of natural durability in timber. *Holzforschung* 17: (2) 54–57.

- SACHSSE, H. & ROFFAEL, E. (1993): Untersuchung der Schäl furnier-Eignung von in Deutschland erwachsenem Douglasienholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 51: 167–176.
- SARANPÄÄ, P. (1994): Basic density, longitudinal shrinkage and tracheid length of juvenile wood of *Picea abies* (L.) Karst. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9: 68–74.
- SAUTER, H. U. (1992): Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wuchsbedingungen, Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau, Freiburg.
- SAUTER, H. U.; MUTZ, R.; MUNRO, B. D. (1999): Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density. *Wood and Fiber Science* 31: (4) 416–425.
- SCHEFFER, T. C. & ENGLERTH, G. H. (1952): Decay resistance of second-growth Douglas-fir. *Journal of Forestry* 50: 439–442.
- SCHMIDT, O. (2006): Wood and tree fungi: Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- SCHMITT, U. & MELCHER, E. (2004): Section staining with potassium permanganate for transmission electron microscopy: A useful tool for lignin localisation. In: Schmitt, U.; Ander, P.; Barnett, J. R.; Emons, A. M. C.; Jeronimidis, G.; Saranpää, P.; Tschegg, S. (Hrsg.): Wood fibre cell walls. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Seiten 105–117.
- SCHMITZ, F.; POLLEY, H.; HENNIG, P.; SCHWITZGEBEL, F.; KRIEBITZSCH, W. U. (2004): Bundeswaldinventur². Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Bonn.
- SCHOBER, R.; KLEINSCHMIT, J.; SVOLBA, J. (1983): Ergebnisse des Douglasien-Provenienzversuches von 1958 in Nordwestdeutschland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 154: (12) 209–236.
- SCHULTZ, T. P.; HARMS, W. B.; FISHER, T. H.; MCMURTREY, K. D.; MINN, J.; NICHOLAS, D. D. (1995): Durability of angiosperm heartwood - The importance of extractives. *Holzforschung* 49: 29–34.
- SCHULTZE-DEWITZ, G. & GÖTZE, H. (1973): Untersuchungen zur Faserlänge, Raumdichte und Druckfestigkeit inter- und circumnodialen Holzes der Baumarten Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Fichte (*Picea abies* Karst.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco). *Drevársky Výskum* 18: (33-44).
- SCHÜTT, P. (2002): Lexikon der Baum- und Straucharten: Nikol Verlags-Gesellschaft, Hamburg.
- SCHWEINGRUBER, F. H. & BAAS, P. (2011): Anatomie europäischer Hölzer: Kessel, Remagen-Oberwinter.
- SCHWERIN, F. (1907): *Pseudotsuga Douglasii caesia*. *Mitteilungen der deutschen dendrologischen Gesellschaft* 16: 257.

- ŠEHO, M. (10.12.2012): Information zur Versuchsfläche Dgl 96 (Fbz. Kandern, Staatswald 5/24), Kopie.
- SENF, J. F.; BENDTSEN, B. A.; GALLIGAN, W. L. (1985): Weak wood - Fast-grown trees make problem lumber. *Journal of Forestry* 83: (8) 477–484.
- SETH, R. S. (2003): The measurement and significance of fines. *Pulp & Paper Canada* 104: (2) 41–44.
- SINGH, A. P.; SCHMITT, U.; MÖLLER, R.; Dawson, B. S. W.; KOCH, G. (2006): Ray tracheids in *Pinus radiata* are more highly resistant to soft rot as compared to axial tracheids: relationship to lignin concentration. *Wood Science and Technology* 40: 16–25.
- SPELLMANN, H. & NAGEL, J. (1989): Zum Einfluß von Ausgangspflanzenzahl und Pflanzverband auf die Jugendentwicklung von Douglasienbeständen. *Forst und Holz* 44: (17) 455–459.
- SPICER, R.; GARTNER, B. L.; DARBYSHIRE, R. L. (2000): Sinuous stem growth in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) plantation: growth patterns and wood-quality effects. *Canadian Journal of Forest Research* 30: (5) 761–768.
- SPURR, A. R. (1969): A low-viscosity epoxy resin embedding medium for electron microscopy. *Journal of Ultrastructure Research* 26: 31–43.
- SQUIRE, G. B.; SWAN, E. P.; WILSON, J. W. (1967): Intra-increment variation in Douglas fir flavonoids by new technique. *Pulp & Paper Canada* 69: 431–437.
- STINGLWAGNER, G.; HASEDER, I.; ERLBECK, R. (2009): Das Kosmos Wald- und Forst-Lexikon: Kosmos, Stuttgart.
- STOEHR, M.; UKRAINETZ, N. K.; HAYTON, L. K.; YANCHUK, A. D. (2009): Current and future trends in juvenile wood density for coastal Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 1415–1419.
- THÜNEN INSTITUT (2014): Dritte Bundeswaldinventur - Ergebnisdatenbank. Thünen Institut (eds.).
- WAGENFÜHR, A. & SCHEIBER, C. (1985): Holzatlas: VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- WAGENFÜHR, R. (1989): Anatomie des Holzes, unter besonderer Berücksichtigung der Holztechnik: Fachbuchverlag, Leipzig.
- WALKER, J. C. F. & NAKADA, R. (1999): Understanding corewood in some softwoods: a selective review on stiffness and acoustics. *The International Forestry Review* 1: (4) 251–259.
- WEIDENBACH, P. (1980): Die Douglasie in Baden-Württemberg. *Holz-Zentralblatt* 106: (18) 277–278.
- WEISE, U.; FLÖSS, M.; KENK, G. (2001): Behandlung und Wertleistung der Douglasie in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst Zeitschrift-Der Wald* 56: 803–806.

- WICHT-LÜCKGE, G. (2014): Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen: Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart.
- WINANDY, J. E. & MORRELL, J. J. (1993): Relationship between incipient decay, strength and chemical composition of Douglas-fir heartwood. *Wood and Fiber Science* 25: (3) 278–288.
- WOBST, J. & BECKER, G. (1997): Möglichkeiten zur Erweiterung des waldbaulichen Einflusses auf die Holzqualität der Douglasie. *Forst und Holz* 52: (19) 555–563.

9 Annex

Abbildungen:

- Zur Untersuchung ausgewählte Radien der 20 Bäume aus dem Standraumversuch
- Mittlerer Spätholzanteil [%] mit dem kambialen Alter [a]
- Mittlere Tracheidenwanddicke [μm] mit dem kambialen Alter [a].
- Mittlerer Mikrofibrillenwinkel [$^\circ$] mit dem kambialen Alter [a]
- Mittlere Dichte [kg/m^3] mit dem kambialen Alter [a]

Tabelle:

- Biege-Elastizitätsmodul korrelationsgewichtete Abgrenzung juvenilen und adulten Holzes

Veröffentlichungen:

- BLOHM, J. H.; EVANS, R.; KOCH, G.; SCHMITT, U.: Identification and characterisation of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) juvenile and adult wood grown in Southern Germany. *Drewno (Wood)*, in review.
- BLOHM, J. H.; MELCHER, E.; LENZ, M. T.; KOCH, G.; SCHMITT, U. (2014b): Natural durability of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) heartwood grown in southern Germany. *Wood Material Science & Engineering* 9: (3) 186–191
- BLOHM, J. H.; KOCH, G.; MELCHER, E.; SAAKE, B.; SCHMITT, U. (2014a): Biochemistry of Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) heartwood grown in Southern Germany. In: Wilson, P. (Hrsg.): Proceedings of the 10th Meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE). Edinburgh, Scotland: Edinburgh Napier University. Seite 226
- BLOHM, J. H.; MELCHER, E.; LENZ, M. T.; KOCH, G.; SCHMITT, U. (2013): Natural durability of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) heartwood grown in Southern Germany. In: Brischke, C.; Meyer, L. (Hrsg.): Proceedings of the 9th Meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE). Hannover, Germany: Leibniz Universität. Seiten 17–22

Annex

Abbildung 53 Zur Untersuchung ausgewählte Radien der 20 Bäume aus dem Standraumversuch. Lineal entspricht 10 cm. Aufnahmen C. Waitkus, ergänzt.

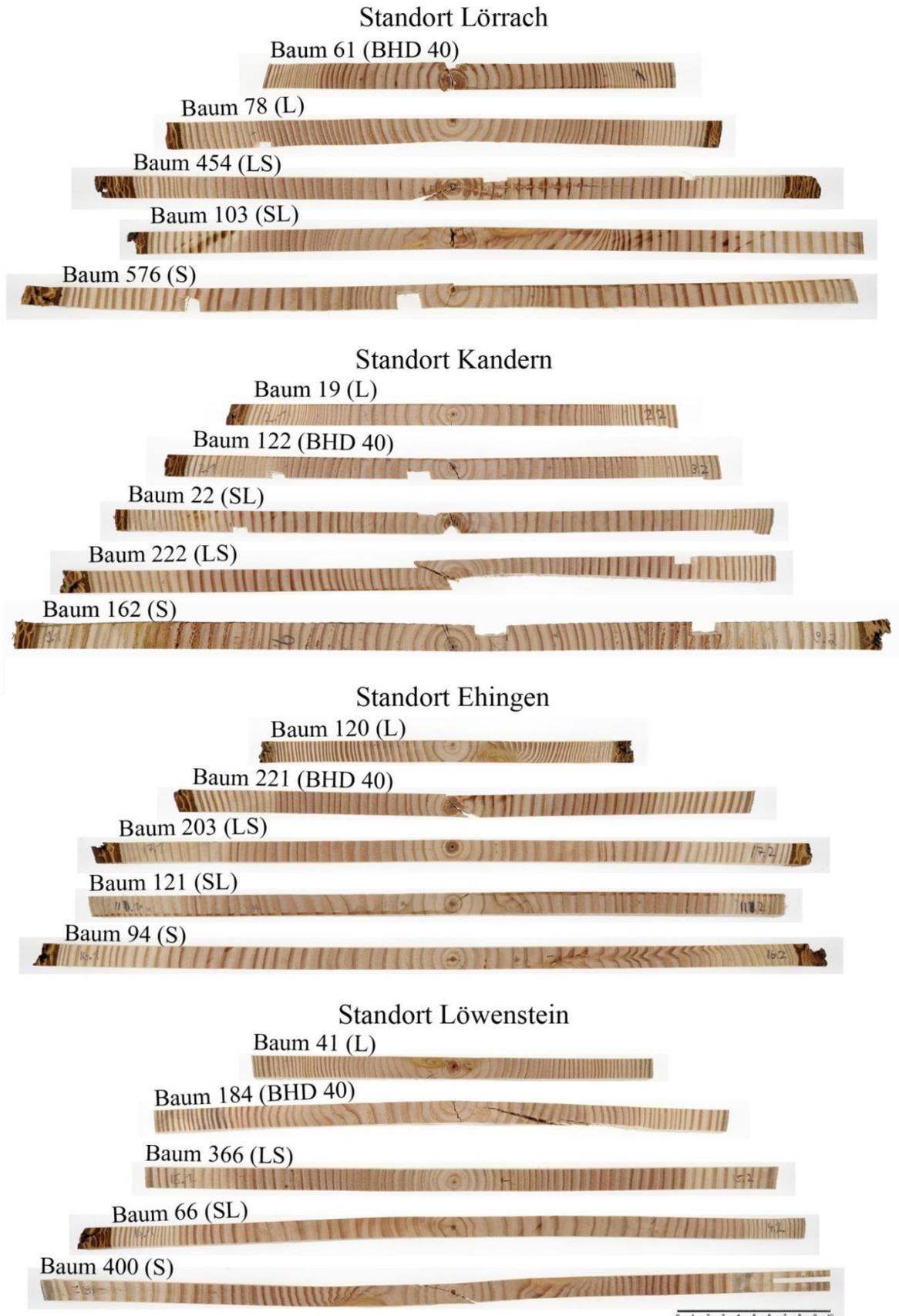


Abbildung 54
 Spätholzanteil [%]
 mit dem kambialen
 Alter [a].
 Pfeil : Eintritt in die
 adulte Phase.

Wuchsmodelle
 (Spalten):
 LS: langsam-schnell
 S: schnell
 BHD 40:
 Brusthöhen-
 Durchmesser 40 cm
 L: langsam
 SL: schnell-langsam

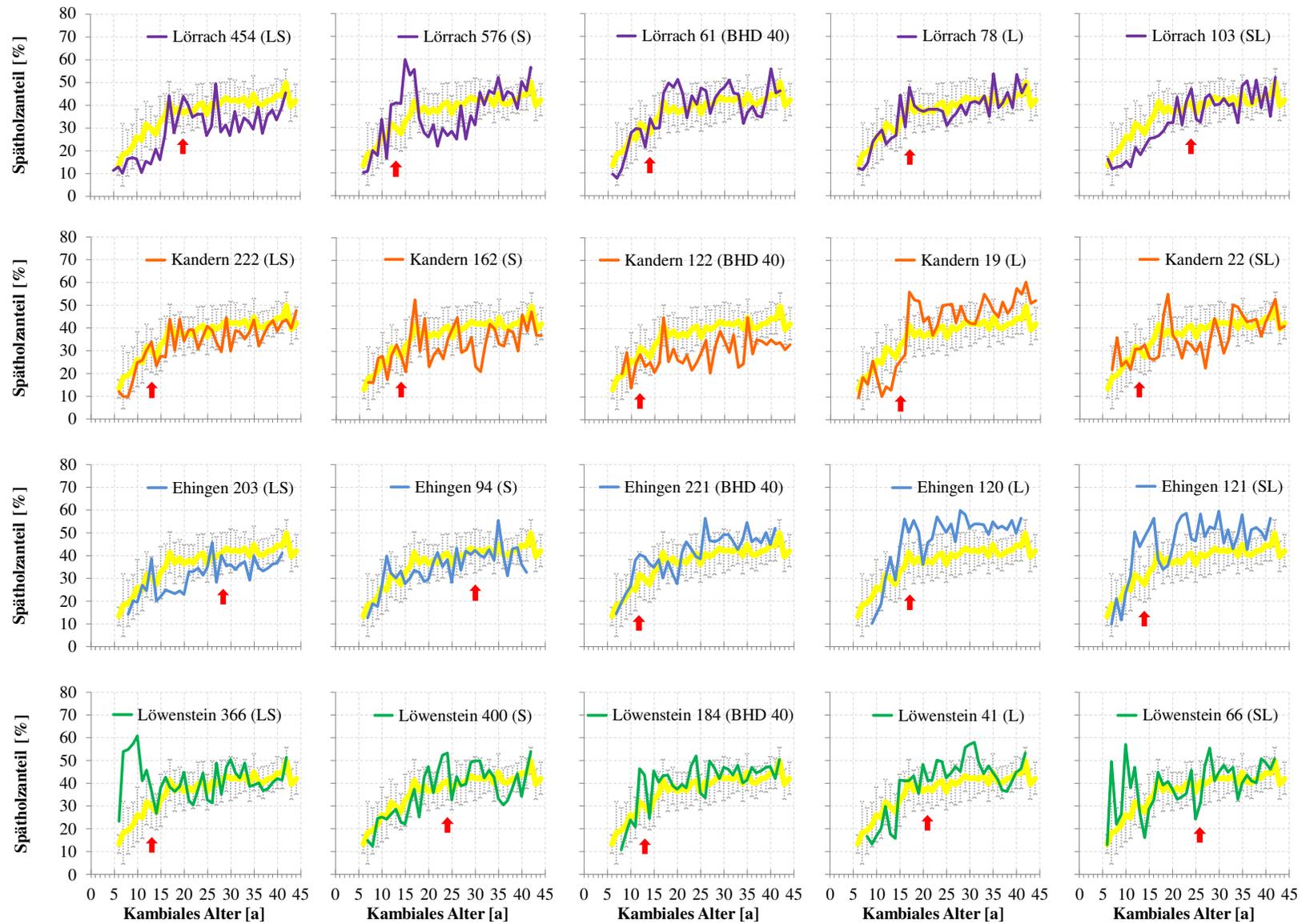


Abbildung 55
 Mittlere Tracheiden-
 wanddicke [μm] mit
 dem kambialen Alter
 [a].
 Pfeil : Eintritt in die
 adulte Phase.

Wuchsmodelle
 (Spalten):
 LS: langsam-schnell
 S: schnell
 BHD 40:
 Brusthöhen-
 Durchmesser 40 cm
 L: langsam
 SL: schnell-langsam

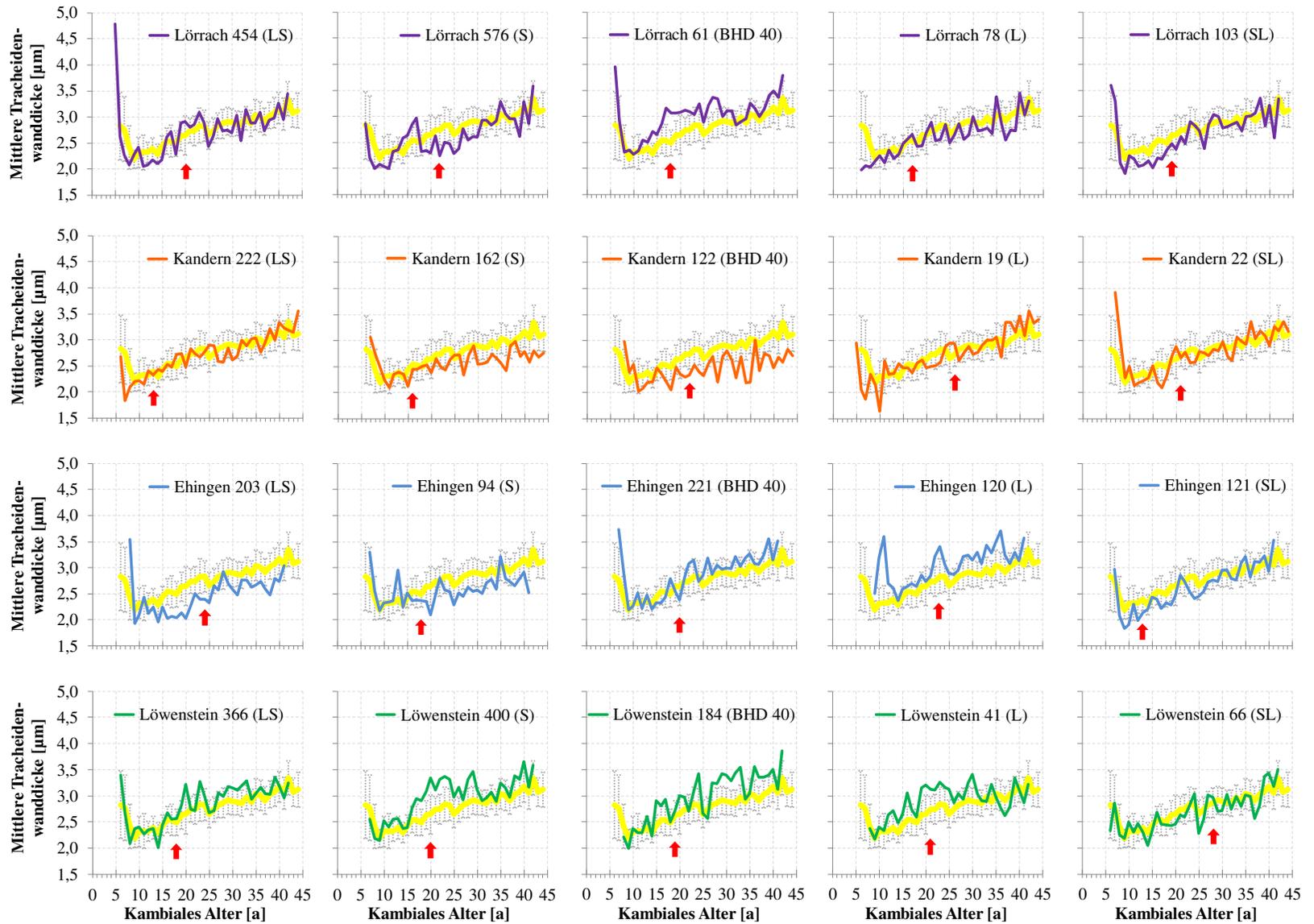


Abbildung 56
 Mittlerer
 Mikrofibrillenwinkel
 [°] mit dem
 kambialen Alter [a].
 Pfeil : Eintritt in die
 adulte Phase.

Wuchsmodelle
 (Spalten):
 LS: langsam-schnell
 S: schnell
 BHD 40:
 Brusthöhen-
 Durchmesser 40 cm
 L: langsam
 SL: schnell-langsam

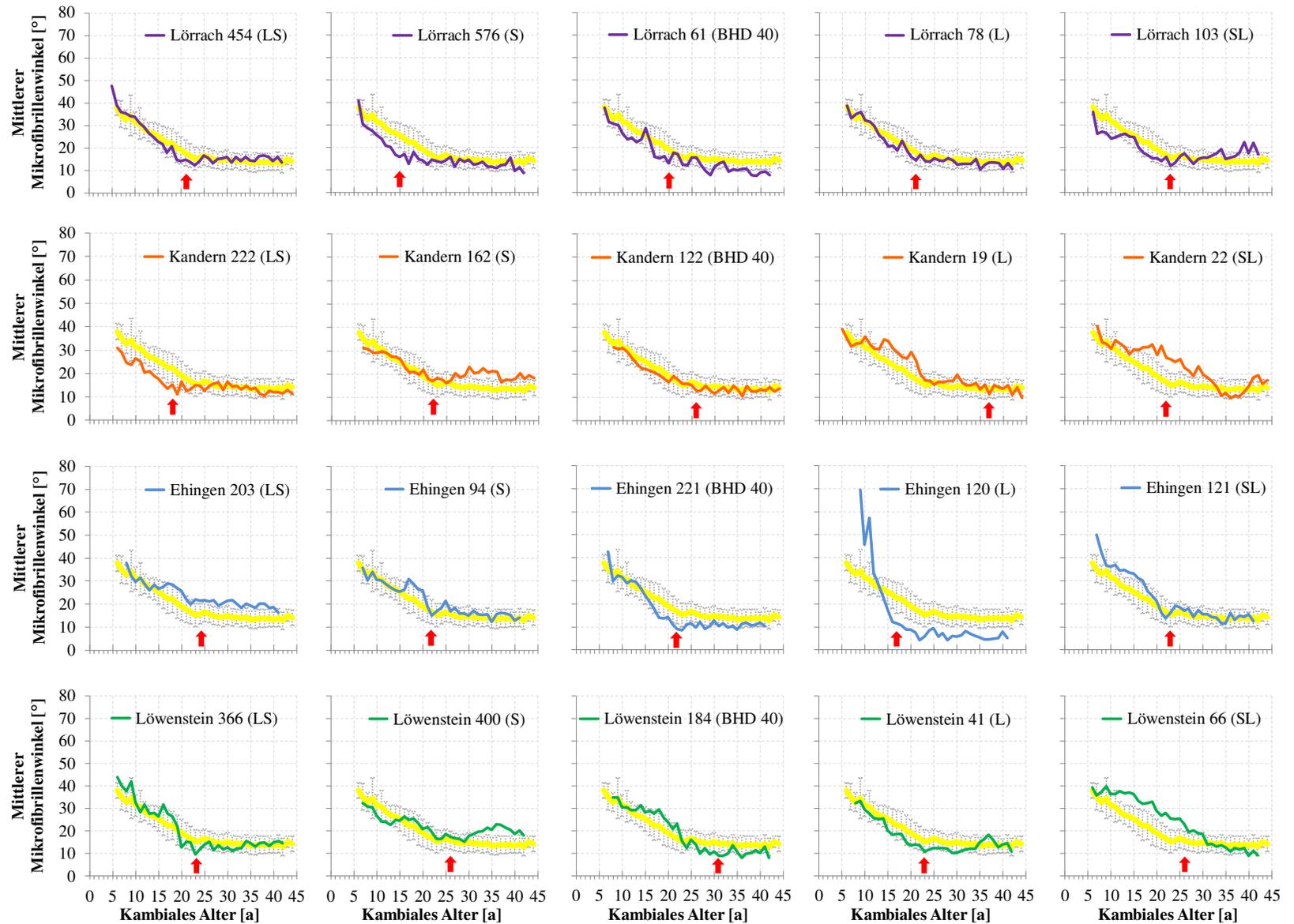


Abbildung 57
 Mittlere Rohdichte
 [kg/m³] bei u~7%
 mit dem kambialen
 Alter [a].
 Pfeil : Eintritt in die
 adulte Phase.

Wuchsmodelle
 (Spalten):
 LS: langsam-schnell
 S: schnell
 BHD 40:
 Brusthöhen-
 Durchmesser 40 cm
 L: langsam
 SL: schnell-langsam

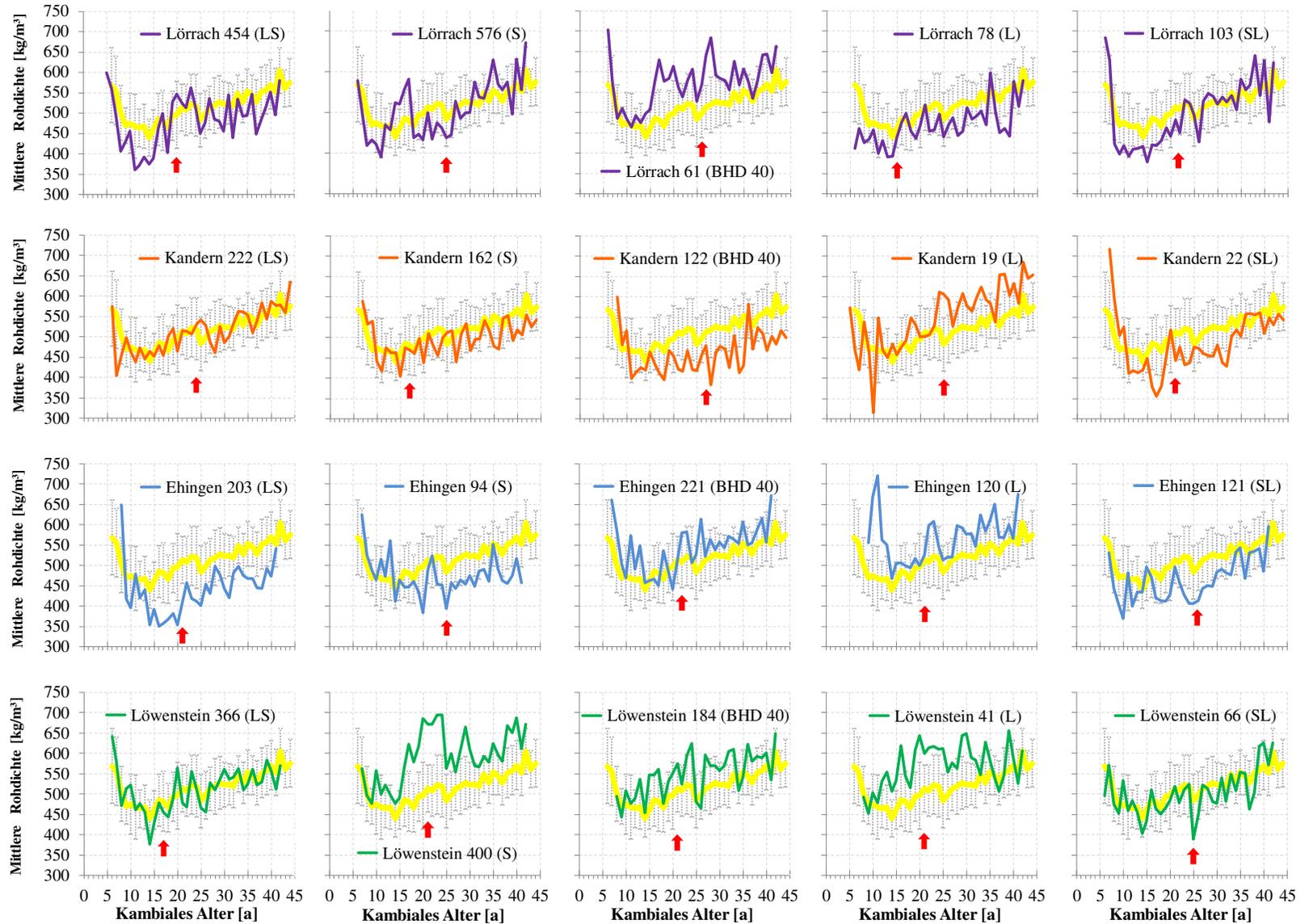


Tabelle 27

Biege-Elastizitätsmodul korrelationsgewichtete Abgrenzung juvenilen und adulten Holzes.

Baum	Mikrofibrillenwinkel		Spätholzanteil		Tracheidenwanddicke		Dichte		Lebensjahr korrelations- gewichteter Eintritt i.d. adulte Phase
	Lebensjahr Eintritt i.d. adulte Phase	Korrelation Elastizitäts- modul / Mikrofibrillen- winkel	Lebensjahr Eintritt i.d. adulte Phase	Korrelation Elastizitäts- modul / Spätholz- anteil	Lebensjahr Eintritt i.d. adulte Phase	Korrelation Elastizitäts- modul / Tracheiden- wanddicke	Lebensjahr Eintritt i.d. adulte Phase	Korrelation Elastizitäts- modul / Rohdichte	
	[a]	R ²	[a]	R ²	[a]	R ²	[a]	R ²	[a]
Standort Lörrach	61	0,64	19	0,67	18	0,79	26	0,77	21
	454	0,68	20	0,85	20	0,80	20	0,75	20
	576	0,62	13	0,67	40	0,87	25	0,81	25
	103	0,74	24	0,91	19	0,57	22	0,68	22
	78	0,67	17	0,78	17	0,88	15	0,80	17
Standort Kandern	19	0,75	15	0,64	33	0,81	25	0,78	28
	122	0,68	12	0,13	27	0,87	30	0,83	27
	22	0,52	13	0,30	20	0,73	20	0,78	20
	162	0,74	14	0,43	16	0,73	17	0,79	18
	222	0,80	13	0,78	13	0,93	37	0,88	20
Standort Ehingen	121	0,59	14	0,44	13	0,76	26	0,75	19
	221	0,50	12	0,71	20	0,81	38	0,77	23
	94	0,78	31	0,62	22	0,74	30	0,81	28
	203	0,72	28	0,72	24	0,66	21	0,73	24
	120	0,38	17	0,74	23	0,62	21	0,50	20
Standort Löwenstein	184	0,71	13	0,51	19	0,81	21	0,76	22
	66	0,79	26	0,28	38	0,71	38	0,86	33
	366	0,45	13	0,00	17	0,83	17	0,71	18
	400	0,82	24	0,74	20	0,87	21	0,89	23
	41	0,69	21	0,83	21	0,84	21	0,81	21

Jan-Henning BLOHM, Robert EVANS, Gerald KOCH, Uwe SCHMITT

**IDENTIFICATION AND CHARACTERISATION OF
DOUGLAS-FIR (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco)
JUVENILE AND ADULT WOOD GROWN IN SOUTHERN
GERMANY**

More than one-third of Germany's Douglas-fir resources stock in age-classes from 21 to 59 years. As such timber increasingly enters markets, detailed knowledge on the anatomy and properties of its wood is of importance for forest managers and wood processors. Wood anatomical and mechanical analyses of the present study were carried out on 20 trees from four scientifically managed plantations in Southern Germany. The age of the trees selected was 42 years whereby varying growth conditions were considered. Juvenile and adult wood were identified by segmented linear regression of radial profiles of anatomical characteristics, such as latewood percentage, tracheid wall thickness microfibril angle and specific gravity. Additionally, width of earlywood, latewood and growth ring as well as bending modulus of elasticity were determined. Varying dependent on the trait used for differentiation, juvenile wood comprised 11-31 growth rings resp. radial amounts of 15-65 %. As compared to adult wood, juvenile wood showed corresponding features of approximately 30 % wider growth rings, 34 % lower latewood percentage, 14 % thinner tracheid walls, and 80 % larger microfibril angles, 11 % lighter wood and 57 % lower bending modulus of elasticity. As the assortment features fast grown trees, adult heartwood characteristics were slightly inferior to characteristics of European Douglas-fir.

Keywords: Douglas-fir, plantation trees, microfibril angle, juvenile/adult wood identification, histometry

Jan-Henning BLOHM (jan.blohm@ti.bund.de), Gerald KOCH (gerald.koch@ti.bund.de), Uwe SCHMITT (uwe.schmitt@ti.bund.de), Thünen Institute of Wood Research, Hamburg, Germany; Robert EVANS (robert.evans@silviscan.com), CSIRO Materials Science and Engineering, Clayton, Australia

Introduction

At the end of the 19th century Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) was re-introduced to Europe, as a fast growing species extending the spectrum of conifers. Forestry regards the rather summer drought resistant coastal form (*var. menziesii/viridis*) as a promising alternative to Norway Spruce which suffers in periods of summer droughts, and therefore intends to enlarge the amount of plantations. The majority of German plantations can be found in the Southwest, where Douglas-fir stocks on 3-6 % of the federal countries forest area [THÜNEN INSTITUTE 2014]. On commercial plantations, tree ages vary mostly between 21-59 years, while rotation periods range from 80-120 years for achieving high value timber. Therefore, the amount, characteristics and quality of juvenile wood (JW) have to be considered. JW can be defined as wood that is formed under the hormonal influence of the apical meristem by young cambium initials while trees are exposed to lateral forces like winds or passing animals [BARNETT, BONHAM 2004; LICHTENEGGER et al. 1999]. The cylinder of JW formed from base to top of a tree, is interpreted as a mechanic optimisation providing flexibility to young tissues prone to breakage. When gravitation forces exceed lateral forces, adult wood (AW) formation starts at the stem base where leverage is maximal and hormonal influence of the apical meristem is minimal. Dependent on genetic and external influence, the amount of JW in Douglas-fir varies by 17 to 30 growth rings [ABDEL-GADIR, KRAHMER 1993b].

As compared to relatively constant characteristics of AW, the anatomical traits of JW show significant variation. In detail, conifer JW wood is characterised by bigger microfibril angles, shorter and thinner walled tracheids and lower latewood percentages. From these, physical and mechanical properties like lower specific gravity, transverse shrinkage and strength can be derived [BENDTSEN 1978]. Because of lower wood quality, JW is rejected for many applications. The aim of this study [BLOHM 2015, tbc] is to identify JW, determine its properties and to quantify differences to adult wood. Accordingly, the obtained results are valuable for both foresters and wood processors in order to optimise silvicultural regimes as well as to quantify JW.

Materials and methods

Investigations were carried out on 20 coast Douglas-fir trees of the seed origin 'Südbaden' from four scientifically managed sites of a growing space experiment. Site elevations and average annual precipitations ranged from 410-780 m and 740-1100 mm. Selected trees were harvested in summer 2012 at average age of 42 ± 1 years representing the widest span of tenable planting/growth conditions. According to the diameter growth induced by means

of silvicultural regimes, five growth types are distinguished: constantly fast growth, constantly slow growth, initial fast growth turned into slow growth, initial slow growth turned into fast growth and growth resulting in a breast height diameter of approximately 40 cm.

From each of the trees, at breast height a disc was obtained out of which the diameter marking the angle bisector of maximum and minimum radius was cut avoiding reaction wood or opposite wood. The radius containing less fibre deviations was chosen for the anatomical investigations.

Prior to the measurements, the radii are cut to the dimensions 2 mm x 7 mm (tangential x longitudinal), extracted with acetone, reconditioned at 40 % relative humidity and 20° C, resulting in a moisture content of about 7%. One transverse surface was polished with sandpaper down to 1500 grit size. Methods include growth ring measurements as described by ANIOL [1987, 1983] regarding both earlywood (EW) and latewood (LW) width, which result in growth ring width (GRW) and latewood percentage (LW%). By means of SilviScan-3[®] radial profiles of tracheid wall thickness (TW), specific gravity (SG), microfibril angle (MFA) and bending modulus of elasticity (MOE) were determined [LUNDQVIST, EVANS 2004]. The SilviScan-3[®] system is an automated tool for rapid determination of wood microstructure. It consists of an image analysis unit, an x-ray diffractometer and an x-ray densitometer, which combine to give a range of primary and secondary data. Data were exported both as radial profiles at 25 micron intervals and as growth ring statistical parameters (average, median, percentiles and standard deviation). In order to differentiate JW and AW, growth ring average LW%, TW, MFA and SG were plotted against cambial age. Following the segmented linear regression model suggested by ABDEL-GADIR & KRAHMER [1993a], each cambial age was presumed to mark the demarcation of JW and AW. The best segmentation of JW and AW was identified by the method of least squares while both connected, but also separated segments were assumed (fig. 2).

For statistic comparison of JW and AW characteristics, the *H*-test of KRUSKAL & WALLIS [1952] was applied with significance levels as proposed by MILLER [1966].

Results and discussion

Segmented linear regression applied on LW%, TW, MFA and SG identifies different cambial ages for the beginning of AW formation [BENDTSEN 1978]. As shown in fig. 1 exemplarily for one of the trees, using LW% results in a cambial age of 12 years to mark the beginning of AW formation, while MFA values result in cambial age of 22 years. Table 1 gives average cambial ages of initial AW formation and the average amounts of JW of the radii. Cambial age of

initial AW formation determined by usage of SG agrees quite well with cambial age of 26 determined by ABDEL-GADIR & KRAHMER [1993a], while another study using SG and MFA resulted in mostly younger cambial ages [BAWCOMBE 2012]. However, wood traits LW% and TW were not yet used for JW and AW demarcation of Douglas-fir. Correlation of average cambial age of initial AW formation and average amount of JW of the radii with individual growing spaces of the 20 trees indicates that the greater the growing space, the later the AW formation starts resp. the higher the amount JW.

Table 1. Average begin of adult wood (AW) formation [cambial age] and juvenile wood (JW) amount of radii [%] identified by latewood percentage (LW%), tracheid wall thickness (TW), microfibril angle (MFA) and specific gravity (SG)

		LW%	TW	MFA	SG
Average cambial age of initial AW formation	[y]	18 ± 6	20 ± 4	23 ± 4	25 ± 7
Average amount of JW	[%]	38 ± 23	45 ± 16	53 ± 15	51 ± 14

In fig. 2, radial profiles of average MFA, LW%, MOE, TW, GRW and SG with cambial age are depicted, regarding segmentations of JW and AW for wood traits used for identification. It is obvious, that LW% (fig. 2b) and TW (fig. 2e) influence SG (fig. 2f) resulting in the SG check pattern described for Douglas-fir [BAWCOMBE 2012; PETERSON et al. 2007; GARTNER et al. 2002; FABRIS 2000, ABDEL-GADIR; KRAHMER 1993a; DI LUCCA 1989].

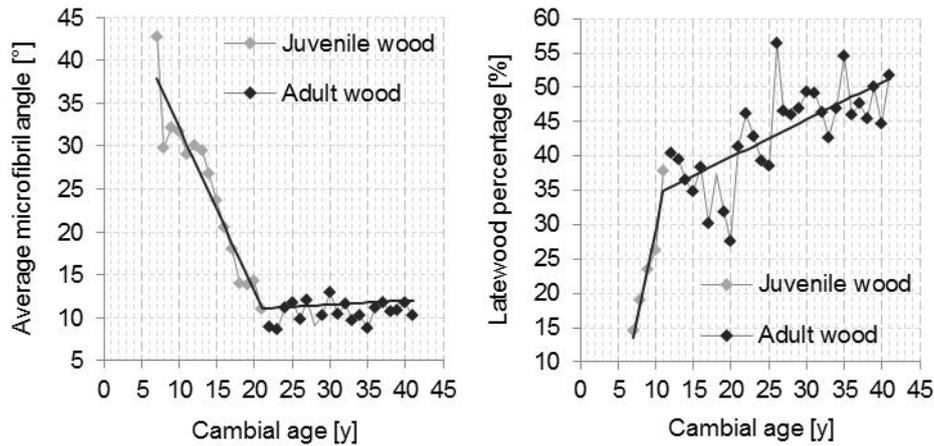


Fig. 1 Segmented linear regression results for identification of begin of adult wood formation by average microfibril angle [°] (left, $R^2 = 0.95$) and latewood percentage [%] (right, $R^2 = 0.77$) with cambial age [y]

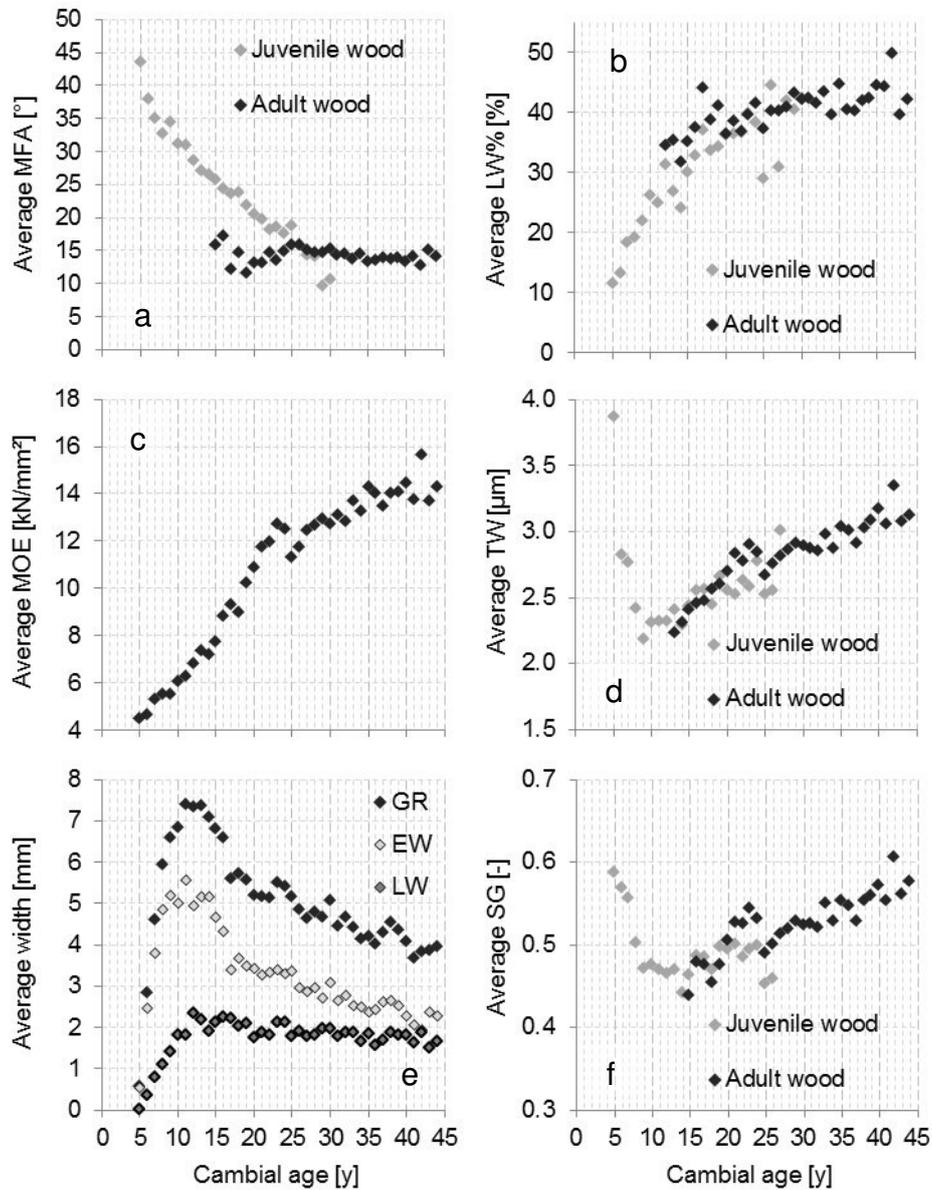


Fig. 2 Radial profiles of properties with cambial age [y]. a) Average microfibril angle (MFA) [°] differentiated for juvenile and adult wood. b) Average latewood percentage (LW%) [%] differentiated for juvenile and adult wood. c) Average bending modulus of elasticity (MOE) [kN/mm²]. d) Average tracheid wall thickness (TW) [μm] differentiated for juvenile and adult wood. e) Average width of growth ring (GR), earlywood (EW) and latewood (LW) [mm]. f) Average specific gravity (SG) [-] differentiated for juvenile and adult wood.

The check pattern is characterized by an initial SG maximum in early formed growth rings, followed by a local minimum in cambial ages coincident with maximal GRW (fig. 2e) and a subsequent increase.

As TW also shows the check pattern, this trait is considered as the key predictor of SG shown by strong correlation ($R^2 = 0,94$) of traits [RATHGEBER et al. 2006]. Contrary to former studies, LW% does not follow the check pattern, which explains weak correlation ($R^2 = 0,23$) calculated for LW% and SG of 730 growth rings. LW% instead increases continually until cambial age 18, after which rather constant percentages were recorded. Average MFA (fig. 2a) and MOE (fig. 2c) reveal reverse trends and by means of high-resolution correlation, MFA is one of the traits predicting MOE ($R^2 = 0,63$). Even stronger, positive correlations were calculated for MOE and SG ($R^2 = 0,79$) as well as for MOE and TW ($R^2 = 0,82$).

Once JW and AW are differentiated, average values of anatomical characteristics can be calculated. Of all characteristics investigated, AW values differ conclusively ($p \leq 0.001$) from JW values as shown in table 2. In comparison with earlier studies, AW average values indicate rather inferior quality, as the assortment features fast grown trees. The only exceptions are LW% of AW, which is in line with both average values of Douglas-fir grown in Northwest America and Europe [BAWCOMBE 2012; LACHENBRUCH et al. 2010; KNIGGE 1958] and SG of both JW and AW which agrees with average values of Douglas-fir grown in Wallonia [POLLET et al. 2013].

Table 2 Characteristics of juvenile wood (JW) and adult wood (AW) and JW/AW ratio.

		Juvenile wood	Adult wood	JW/AW ratio
Growth ring width	[mm]	6.2 ± 38 %	4.8 ± 44 %	1.30
Latewood percentage	[%]	27 ± 44 %	41 ± 22 %	0.66
Tracheid wall thickness	[µm]	2.4 ± 38 %	2.8 ± 43 %	0.86
Microfibril angle	[°]	27 ± 33 %	15 ± 53 %	1.80
Specific gravity	[-]	470 ± 43 %	526 ± 52 %	0.89
Bending modulus of elasticity	[kN/mm ²]	2.4 ± 38 %	5.6 ± 19 %	0.43

Conclusion

Studies revealed that besides JW and AW differentiation by means of segmented linear regression of radial SG and MFA profiles, also LW% and TW enable distinction. Characteristics of the identified juvenile wood are of conclusive inferior quality as compared to adult wood. Average characteristics of the adult

wood investigated are slightly lower than reported for European Douglas-fir due to the involvement of fast grown trees in the assortments selection.

References

- Abdel-Gadir A. Y., Krahmer R. L.** [1993a]: Estimating the age of demarcation of juvenile and mature wood in Douglas-fir. *Wood and Fiber Science* 25 [3]: 242–249.
- Abdel-Gadir A. Y., Krahmer R. L.** [1993b]: Genetic variation in the age of demarcation between juvenile and mature wood of Douglas fir. *Wood and Fiber Science* 25 [4]: 384–394.
- Aniol R. W.** [1983]: Tree ring analysis using Catras. *Dendrochronologia* 1: 45–53.
- Aniol R. W.** [1987]: A new device for computer assisted measurement of tree-ring widths. *Dendrochronologia* 5: 135–141.
- Barnett J. R., Bonham V. A.** [2004]: Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews* 79: 461–472.
- Bawcombe J.** [2012]: A study of Douglas-fir anatomical and mechanical properties and their interactions, Dissertation. University of Bath, Bath.
- Bendtsen B. A.** [1978]: Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal* 28 [10]: 61–72.
- Blohm J. H.** [2015]: Holzqualität und Eigenschaften des juvenilen und adulten Holzes der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) aus süddeutschen Anbaugebieten, Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg.
- Di Lucca C.** [1989]: Juvenile-mature wood transition. Kellogg, R. M., Vancouver B.C.: Forintek Canada Corp.
- Fabris S.** [2000]: Influence of cambial ageing, initial spacing, stem taper and growth rate on the wood quality of three coastal conifers, Dissertation. University of British Columbia, Vancouver B.C.
- Gartner B. L., North E. M., Johnson G. R., Singleton R.** [2002]: Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 439–447.
- Knigge W.** [1958]: Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Holzeigenschaften und Wuchs der Gastbaumart Douglasie (*Pseudotsuga taxifolia* Britt.): J. D. Sauerländer's, Frankfurt am Main.
- Kruskal W. H., Wallis W. A.** [1952]: Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47 [260]: 583–621.
- Lachenbruch B., Johnson G. R., Downes G. M., Evans R.** [2010]: Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 55–64.

Lichtenegger H., Reiterer A., Stanzl-Tschegg S., Fratzi P. [1999]: Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods - A possible strategy of mechanical optimization. *Journal of Structural Biology* 128: 257–269.

Lundqvist S. O., Evans R. [2004]: Illustration of wood and fiber measurements with SilviScan. In: STFI Report: STFI.

Miller D. A. [1966]: 'Significant' and 'highly significant'. *Nature* 210: 1190.

Peterson M. G., Dietterich H. R., Lachenbruch B. [2007]: Do Douglas-fir branches and roots have juvenile wood? *Wood and Fiber Science* 39 [4]: 651–660.

Pollet C., Henin J. M., Jourez B., Hebert J. [2013]: Impact of growth rate on the mechanical properties of Douglas-fir grown in Wallonia (Southern Belgium). IUFRO, Nancy: Measurement methods and modelling approaches for predicting desirable future wood properties.

Rathgeber C. B. K., Decoux V., Leban J. M. [2006]: Linking intra-tree-ring wood density variations and tracheid anatomical characteristics in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Annals of Forest Science* 63: 699–706.

Thünen Institute [2014]: Dritte Bundeswaldinventur - Ergebnisdatenbank. Thünen Institut (eds.).

ORIGINAL ARTICLE

Natural durability of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) heartwood grown in southern Germany

JAN H. BLOHM¹, ECKHARD MELCHER¹, MARIE T. LENZ², GERALD KOCH¹, & UWE SCHMITT¹

¹Thünen Institute of Wood Research, Hamburg, Germany, ²Department of Wood Science, University of Hamburg, Hamburg, Germany

Abstract

The natural durability of timber is an important property in order to assess its performance in service. For numerous species grown in primary forests, this property has already been determined. As plantation-grown timber becomes more and more important, detailed information on its properties is needed, because increasing amounts of this material are coming to the market. The majority of planted Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) in Germany is around 40 years old. In the present study, representative material of totally ten trees from two different sites in the south of Germany was investigated with regard to natural durability. In laboratory tests based on European standard DIN EN 350-1, inner and outer heartwood zones were exposed to basidiomycetes. Density measurements were additionally used for further characterisation of this material. Results showed a lower durability of the plantation-grown Douglas fir wood as compared with wood from natural sites. Significant differences for both durability and density were found between inner and outer heartwood, even though no correlation between the parameters was recognised. Data illustrate that for a better understanding of durability variations, chemical, topochemical and electron microscopic studies are needed.

Keywords: Natural durability, Douglas fir, heartwood, plantation, utilization

Introduction

Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) has its natural distribution in western North America and its wood represents a valuable commercial timber widely used not only for construction and building purposes, but also for outdoor applications such as terrace flooring (Bormann 1984). This is possible because DIN EN 350-2 (1994) lists Douglas fir heartwood from North American natural sites in durability class (DC) 3 which means 'moderately durable'. Due to naturally grown Douglas fir's versatile options of application, there was great interest to also introduce this species to Europe.

First trees were already planted in the second half of the nineteenth century, whereby larger plantations were established hundred years later (Kownatzki *et al.* 2011). In 2008, Douglas fir plantations covered 2% of the total forest area in Germany – with an increase of 15% compared to 2002 (Polley *et al.*

2009). Besides commercial motivation, as well for scientific purposes, areas were planted by forest research institutions all over Germany. Diverse constellations regarding plants per hectare and spacings between seedlings (Abetz 1971) were realised. In total, the major age class of Douglas fir planted in Germany is comprised of material which is 32–51 years old (Schmitz *et al.* 2004).

As plantation timber increasingly enters the market nowadays, in many European countries, the question of wood properties and especially natural durability of such material arose (Akhter and Hale 2002a, b, Pollet *et al.* 2013). Earlier reports gave a general description (Göhre 1958, Sauter 1992) and some information on the natural durability from orientating laboratory (Augusta 2007) and outdoor tests (Rapp *et al.* 2010).

Haupt *et al.* (2003) could proof that Teak (*Tectona grandis* L.F.) cultivated in plantations had a lower durability than material from natural sites. If this

were transferable to other species, information on the natural durability of Douglas fir grown in plantations of southern Germany might be important for users.

It is the aim of this study to test representative material with special regard to inner and outer heartwood zones.

Materials and methods

The ten Douglas fir trees investigated were 41–44 years old. Because of this, they represented the major age class of German Douglas fir plantations. The material was felled in June 2012 at the neighboured (15 km) forest districts of Lörrach and Kandern in the southwest of the federal state of Baden-Württemberg near the border to Switzerland. Five trees from each site covered a wide spectrum in terms of varying spacings and number of individuals per hectare (Table I).

Samples were sawn out of kiln dried ($T \leq 60^\circ\text{C}$) core planks from stem heights between 1.35 and 3.35 m. At the lower end of this segment, disks showed radii from 15 to 26 cm (Figure 1).

Although the age of the trees was almost similar, also growth-ring widths ranged from 0.3 to 12.1 mm.

For a comprehensive characterisation of the heartwood, the sampled zones were defined as follows:

- ‘inner heartwood’ was taken from the fifth growth ring outwards, while
- ‘outer heartwood’ was taken from areas close to the transition to sapwood inwards.

Since the outer heartwood ring width could be grouped in wide-ringed (6 individuals) rather narrow-ringed (4) material, the common term ‘adult wood’ fits only the latter. Therefore, the age-related

terms were rejected, even though at least the first 15 rings showed typical juvenile wood structure.

Laboratory tests were carried out according to DIN EN 350-1 (1994). In total, 440 Douglas fir heartwood samples were used for durability tests:

- 360 test samples exposed to basidiomycetes: 3 test fungi \times 6 replicates \times 2 sites \times 5 trees \times 2 zones (inner and outer heartwood),
- 40 humidity controls (HC): 2 samples of each zone to calculate a theoretical oven-dry weight for each test sample,
- 40 control samples without fungal inoculation: 2 samples of each zone to determine a correction of weight (Eq. 4), if there was any.

Additional 30 Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood reference samples were treated similarly to the test samples.

All sample measurements were 50 ± 0.5 (a) \times 25 ± 0.5 (r) \times 15 ± 0.5 (t) mm^3 at 12% moisture content. Inhomogeneities like, for example, cracks, discoloration and branches were excluded. Radial and tangential sides of the samples had to be parallel to the grain and growth rings running tangential to radial sides were not allowed.

For cultivation of the basidiomycetes, a growth medium consisting of 4% malt extract and 2% agar was diluted in tap water of hardness 0.41–0.78 mg/L CaO.

The three basidiomycetes involved in the laboratory tests were brown rot fungi:

- *Coniophora puteana* (Schumacher ex Fries), Karsten (Stamm BAM Ebw. 15),
- *Poria placenta* (Fries), Cooke sensu J. Eriksson (Stamm FPRL 280) and
- *Gloeophyllum trabeum* (Persoon ex Fries), Murrill, (Stamm BAM Ebw. 109).

Table I. Overview of material investigated.

Tree	Site	Spacings (m^2)	Individuals per hectare (n/ha)	Diameter at 1.35 m (cm)	Number of sapwood rings	Heartwood percentage (%)
11	Lörrach (planted 1970)	5 \times 2.00	1000	26.7	21	69.7
12		5 \times 1.00	2000	46.5	12	68.6
13		2 \times 1.25	4000	51.2	13	71.5
14		5 \times 1.00	2000	42.7	15	72.8
15		3 \times 1.67	2000	34.6	13	73.1
21	Kandern (planted 1968)	3 \times 3.33	1000	28.2	15	71.6
22		5 \times 2.00	1000	34.9	17	67.3
23		5 \times 4.00	500	42.1	16	72.9
24		3 \times 1.67	2000	52.9	13	70.7
25		5 \times 1.00	2000	44.4	13	73.2

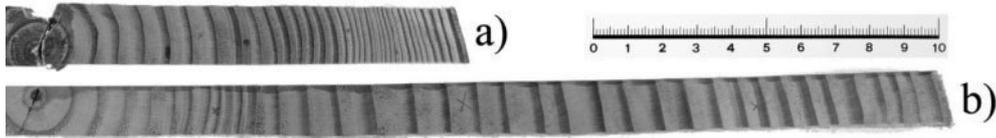


Figure 1. Radii involved in the investigations (a) Smallest radius of all trees from 1000 individuals/hectare stands (26.7 cm); (b) Largest radius of all trees from 4000 individuals/hectare stands (51.2 cm). Scale represents 10 cm.

By transferring small pieces of older mycelium in petri dishes filled with growth medium, active mycelium was cultivated. In sterile environment, jars filled with 60 ml of growth medium were inoculated and subsequently overgrown by the different basidiomycetes.

All Douglas fir samples were conditioned in a climatic chamber ($20 \pm 2^\circ\text{C}/65 \pm 5\% \text{RH}$) for four weeks. Thereafter, weights after conditioning of all samples and volumes of moisture content control samples were determined. Subsequently, humidity controls and Scots pine sapwood references were oven-dried for 24 hours at $103 \pm 2^\circ\text{C}$ and – after cooling down in desiccators – weighed again to ascertain oven-dry weights.

For all following calculations, the six replicates representing the inner or outer heartwood zone of a tree contributed to averaged values. Zone-wise two humidity controls and two control samples served for the determination of parameters like density, moisture content and possible change of weight caused by anything else than fungal degradation.

Subsequently, oven-dry volume of humidity controls as well as average moisture content \bar{u} (Equation 1):

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum \frac{[m_{u \text{ climate}} - m_0]}{m_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$m_{u \text{ climate}}$: climate weights of humidity controls (g)

m_0 : oven-dry weights of humidity controls (g)

and the average oven-dry density $\bar{\rho}_0$ (Equation 2):

$$\bar{\rho}_0 = \frac{1}{n} \sum \frac{m_0}{V_0} \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad (2)$$

m_0 : oven-dry weight of humidity controls (g)

V_0 : oven-dry volumes of humidity controls (cm^3) were calculated.

Based on initial weights and transferred average moisture contents from the humidity controls, theoretical oven-dry weights $m_{0 \text{ theo.}}$ were computed for test and control samples (Equation 3):

$$m_{0 \text{ theo.}} = \frac{m_{u \text{ climate}}}{\frac{\bar{u}}{100} + 1} \quad (\text{g}) \quad (3)$$

$m_{u \text{ climate}}$: climate weights of test/control samples (g).

The calculation of such theoretical oven-dry weights was necessary because severe drying conditions might change essential wood properties. It could be assumed that results obtained from testing absolutely dried material were less representative than those results with small deviations due to the procedure described above.

To prevent external infections, samples except humidity controls were packed in polyethylene foil and sterilised by cobalt-60- γ irradiation with an intensity of 31.2 kGy. In sterile environment, the six replicates per zone then were divided in groups of two samples per jar. Placement of every sample on a serrated lock washer should avoid direct moisture transfer from the growth medium. The jars were kept for 16 weeks in a dark chamber at $22 \pm 2^\circ\text{C}$ and $70 \pm 5\% \text{RH}$, while jars were not totally closed to guarantee air exchange.

At the end of the test, growth area and growth density were rated. In addition, special observations like, for example, fungi growth by wall contact or external infections were noted. After removal of surface mycelium, the final wet weight of each sample was determined. In order to avoid moisture uptake, this had to be done rather quickly. In the following, all samples were oven-dried, cooled and weighed again for final oven-dry weights $m_{0 \text{ final}}$. Relating theoretical oven-dry and final oven-dry weight, corrected percentage mass losses $\Delta m_{\text{corrected}}$ were calculated for each test sample regarding an averaged correction term $\overline{\Delta m}$ computed for each of the heartwood zones individually from the control samples (Equation 4):

$$\Delta m_{\text{corrected}} = \frac{m_{0 \text{ theo.}} - m_{0 \text{ final}}}{m_{0 \text{ theo.}}} \times 100 \pm \overline{\Delta m} \quad (\%) \quad (4)$$

$m_{0 \text{ theo.}}$: theoretical oven-dry weight of test samples (g)

$m_{0 \text{ final}}$: final oven-dry weight of test samples (g)

$\overline{\Delta m}$: average mass loss of control samples (%).

Average mass losses were calculated and set in relation to the corresponding average mass loss determined for the references (Equation 5). By means of resulting x values, according to DIN

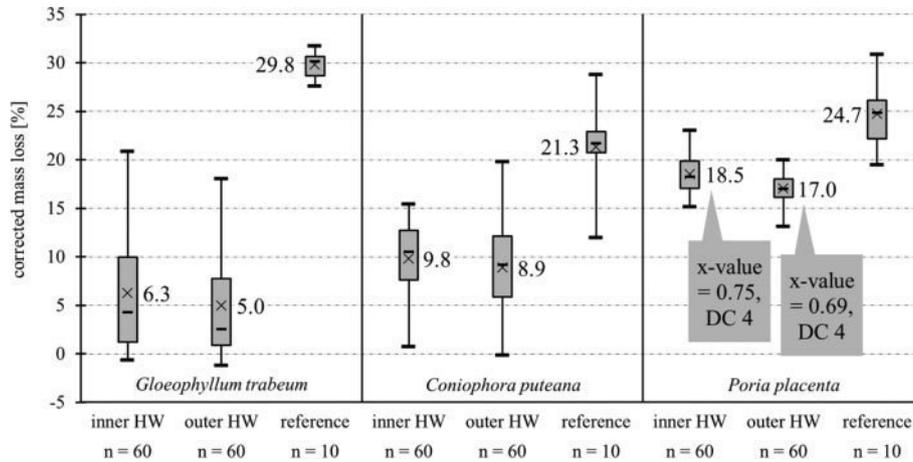


Figure 2. Average corrected mass loss (%) of Douglas fir inner and outer heartwood and Scots pine sapwood references.

EN 350-1 (1994; Table 3), the durability class for each zone was defined.

$$x \text{ value} = \frac{\overline{\Delta m_{\text{corrected}}}}{\overline{\Delta m}} \quad (5)$$

$\overline{\Delta m_{\text{corrected}}}$: average corrected mass loss of each zone (%)
 $\overline{\Delta m}$: average mass loss of references (%).

Results

Analyses of the 40 representative humidity controls revealed an average oven-dry density of $436 \pm 43 \text{ kg/m}^3$. Further evaluation of the selected zones showed a significant difference in oven-dry density between inner ($412 \pm 32 \text{ kg/m}^3$) and outer ($461 \pm 36 \text{ kg/m}^3$) heartwood.

Attacking the pine reference samples, each of the fungi reached average corrected mass losses above 20%. In accordance to DIN EN 350-1 (1994),

results of the natural durability laboratory test were therefore valid.

For Douglas fir, independent of site and heartwood zone with 17.8% average corrected mass loss *P. placenta* caused the highest amount of decay and was therefore relevant for classification. Also used fungi *C. puteana* achieved 9.3% and *G. trabeum* 5.6% average corrected mass loss. Hereby average moisture contents increased correspondingly to average corrected mass losses from 35.5% (*G. trabeum*) to 40.5% (*C. puteana*) to 70.7% (*P. placenta*).

As for all fungi conclusive ($p < 0.001$) corrected mass loss differences were found between inner and outer heartwood zones (Figure 2), for *P. placenta* separate *x* values for inner (*x* value 0.75, DC 4) and outer heartwood (*x* value 0.69, DC: 4) were determined. With an overall *x* value of 0.72, Douglas fir heartwood was classified as less durable (DC 4) (EN 350-1 1994; Table 3). Besides mentioned, negative outliers for *G. trabeum* were caused by control samples correction terms.

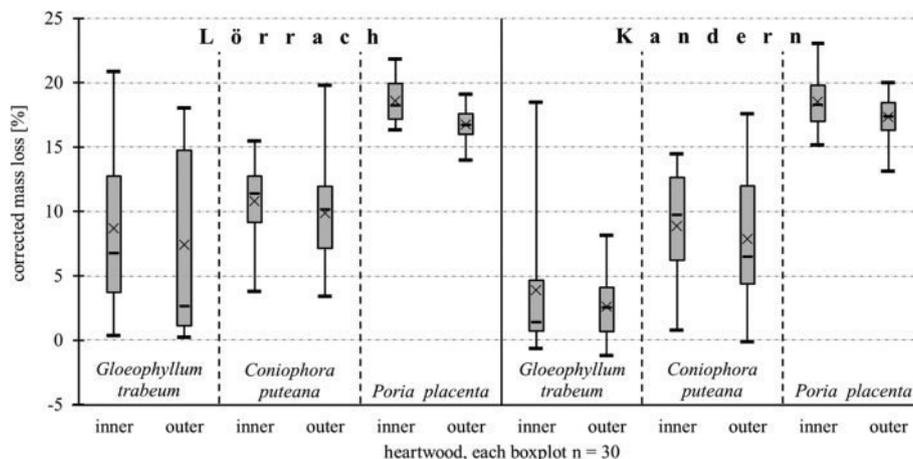


Figure 3. Average corrected mass loss (%) of Douglas fir inner and outer heartwood evaluated in terms of site.

Table II. Evaluation of *C. puteana* and *P. placenta* growth area (% of sample surface) and corrected mass loss (%).

Fungus	Growth area	Average corrected mass loss (%)	Standard deviation (%)	Number of samples
<i>C. puteana</i>	No growth	1.3	1.08	4
	0–33%	7.7	4.20	25
	34–66%	10.0	3.48	90
	67–99%	19.8	0.00	1
	Totally overgrown	17.9	1.56	14
<i>P. placenta</i>	67–99%	17.8	1.90	106
	Totally overgrown	17.8	1.91	107

When comparing trees from the two sites, decisive ($0.05 > p > 0.01$) differences in corrected mass loss occurred only for *G. trabeum* (Figure 3). This fungus caused minor mass losses, so cumulated evaluation of both sites was legitimate.

A noteworthy observation was the linkage of mass losses with both growth area and growth density for *C. puteana*. Exemplarily shown for growth area (Table II), it was found that the higher the mass loss, the more the surface of a sample was covered with mycelium. As *P. placenta* almost totally covered the samples, mass losses were uniform.

Discussion

Douglas fir timber was investigated in terms of density and natural durability with special regard to earlier and recently formed heartwood.

Density values of both sample series were distinctly lower than those recorded in earlier studies for Douglas fir grown in Germany which ranged from 524 kg/m³ (Göhre 1958) to 504–536 kg/m³ (Sauter 1992). As all samples were without any inhomogeneity such as knots, density of customary material cut from the trees involved might be higher. Primary growth material is referenced with values from 320 to 470 to 730 kg/m³ (Wagenführ and Scheiber 1985), so that the investigated material has to be considered as ‘light’. Approaches to explain such strong heterogeneity of Douglas fir density focused on radial diameter and cell-wall thickness of latewood tracheids (Rathgeber *et al.* 2006).

The results of our durability tests are in line with Pollet *et al.* (2013), Rapp *et al.* (2010) and Augusta (2007). The timber examined by Pollet *et al.* (2013) was slightly older, but still the highest mass losses caused by *P. placenta* led to classification in durability class 4.

Focusing on radial differentiation, Dünisch *et al.* (2009) recorded a higher durability class for adult heartwood of *Robinia pseudoacacia* L. than for juvenile heartwood. Although in some cases age-related anatomical characteristics such as decreasing ring

widths were observed (Figure 2), the durability (Figure 1a) classes between inner and outer heartwood were not differing like for *Robinia*.

Linking results found for both parameters, no correlations between density and x value (Rehbein and Koch 2010) were found for *C. puteana* and *G. trabeum*, while *P. placenta* had at least a coefficient of determination of 49%. Regarding growth patterns and mass loss, it could be assumed that high mass losses are related with high amount/dense coverage of the timber with mycelium. Due to the ranges of obtained results this assumption was not valid vice versa.

In conclusion, the results indicated that natural durability of heartwood from plantation-grown Douglas fir trees is less durable (DC 4), whereby density could not serve as an indicator of natural durability. Possibly, natural durability may correlate with other anatomical parameters, e.g. growth-ring widths. Nevertheless, the most promising attempt is the determination of the amount and distribution of the flavonoid taxifolin, an extractive and active ingredient responsible for durability (Kennedy 1956). As Haupt *et al.* (2003) stated for *Tectona*, the amount of active ingredients has to be focused on, not the extractive content in general.

Future studies will additionally include material from more sites and also decay experiments with white rot fungi.

Independent of further biological tests, information on the treatability is necessary, if this timber shall be used in use class 3 and especially in use class 4 (DIN EN 335 2013) applications.

Acknowledgements

The authors are grateful to the Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, for providing the Douglas fir trees, Christina Waitkus for excellent photographic support and Matthias Höpken for precise sample preparation. This work was funded by the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Project No. 22037111).

References

- Abetz, P. (1971) Douglasien-Standraumversuche – Ein Gemeinschaftsprojekt Forstlicher Versuchsanstalten und Landesforstverwaltungen [Douglas fir provenience trails – A joint-venture of forest research institutions and federal forest administrations]. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, 26, 448–449.
- Akhter, S. and Hale, M. D. C. (2002a) Variation in durability of British grown Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Part I. Effect of density and growth rate. IRG/WP 02-10445. In IRG (ed.) *Proceedings of the 33rd annual meeting of the International Research Group on Wood Preservation*, (The International Research Group on Wood Preservation: Stockholm), pp. 14.
- Akhter, S. and Hale, M. D. C. (2002b) Variation in durability of British grown Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Part II. Effect of extractive contents and taxifolin. IRG/WP 02-10446. In IRG (ed.) *Proceedings of the 33rd annual meeting of the International Research Group on Wood Preservation*, (The International Research Group on Wood Preservation: Stockholm), pp. 11.
- Augusta, U. (2007) Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich [Natural durability studies on trade-relevant timbers in different outside conditions]. Dissertation (Hamburg: Universität Hamburg).
- Bormann, B. T. (1984) *Douglas-Fir an American Wood* (Washington DC (FS-235): USDA Forest Service).
- DIN EN 335. Juni 2013 *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten* [Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products], (Berlin: Beuth Verlag).
- DIN EN 350. Oktober 1994 *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz* [Durability of Wood and Wood-based Products – Natural Durability of Solid Wood]. Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz [Guide to the principles of testing and classification of natural durability of wood]; Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa [Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe]. (Berlin: Beuth Verlag)
- Dünisch, O., Richter, H. G. and Koch, G. (2009) Wood properties of juvenile and mature heartwood in *Robinia pseudoacacia* L. *Wood Science and Technology*, 44, 301–313.
- Göhre, K. (1958) *Die Douglasie und ihr Holz* [Douglas fir and its wood] (Berlin: Akademie-Verlag).
- Haupt, M., Leithoff, H., Meier, D., Puls, J., Richter, H. G. and 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.
- Kennedy, R. W. (1956) Fungicidal toxicity of certain extraneous components of Douglas-fir heartwood. *Forest Products Journal*, 6, 80–84.
- Kownatzki, D., Kriebitzsch, W. U., Bolte, A., Liesebach, H., Schmitt, U. and Elsasser, P. (2011) *Zum Douglasienanbau in Deutschland. Landbauforschung* [On the growing of Douglas fir in Germany], Sonderheft 344.
- Pollet, C., Henin, J. M., Hebert, J. and Jourez, B. (2013) Effect of growth rate on the natural durability of Douglas-fir in Western Europe. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 891–896.
- Polley, H., Hennig, P. and Kroiher, F. (2009) Ergebnisse einer Kohlenstoffinventur auf Bundeswaldinventur-Basis. Baumarten, Altersstruktur und Totholz in Deutschland [Results of a carbon-inventory based on national forest inventory. Species, age distribution and deadwood in Germany]. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, 64, 1074–1075.
- Rapp, A. O., Augusta, U., Brandt, K. and Melcher, E. (2010) Natürliche Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten. Ergebnisse aus acht Jahren Feldversuch. In *Holzforchung Austria* (ed.), *Wiener Holzschutztage 2010* (Wien: Holzforchung Austria), pp. 43–49. ISBN 978-3-9503036-1-2.
- Rathgeber, C. B. K., Decoux, V. and Leban, J. M. (2006) Linking intra-tree-ring wood density variations and tracheid anatomical characteristics in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Annals of Forest Science*, 63, 699–706.
- Rehbein, M. and Koch, G. (2010) Wie dauerhaft ist die Sibirische Lärche? [How durable is Siberian larch?] *Holz-Zentralblatt*, 136, 847–848.
- Sauter, H. U. (1992) Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wuchsbedingungen [Technological wood properties as a characteristic of different conditions of growth]. Dissertation (Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau).
- Schmitz, F., Polley, H., Hennig, P., Schwitzgebel, F. and Kriebitzsch, W. U. (2004) *Bundeswaldinventur². BWI² – Das Wichtigste in Kürze. Ed. Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)* [Second national forest inventory - The essentials in brief]. (Bonn: Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)). Accessed 4 April 2013, available at: <http://www.bundeswaldinventur.de>
- Wagenführ, A. and Scheiber, C. (1985) Douglasie. *Holz atlas* (Leipzig: VEB Fachbuchverlag), pp. 671–672.

Biochemistry of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) heartwood grown in Southern Germany

Jan-Henning BLOHM^{1,2} · Gerald KOCH¹ · Eckhard MELCHER¹ · Bodo SAAKE² · Uwe SCHMITT¹

¹Thünen Institute of Wood Research, Hamburg, Germany

²Department of Wood Science, University of Hamburg, Germany

Natural durability

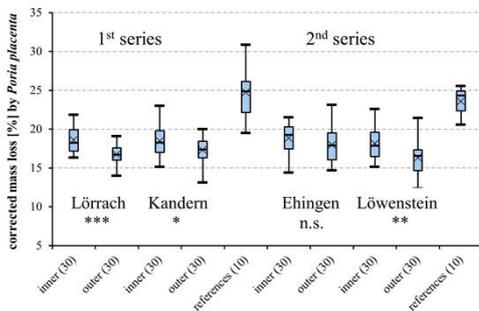


Figure 1: Corrected mass loss [%] evoked by *Poria placenta* on Douglas fir inner and outer heartwood from four sites and pine sapwood references in two natural durability tests. Intra-site differences (inner/outer) marked below sites. Number of samples in brackets. n.s. = not significant, * 0.05 > p ≥ 0.01, ** 0.01 > p ≥ 0.001, *** 0.001 > p.

Experimental

- Douglas fir from four sites in Southern Germany, wide spectrum of silvicultural variation
- inner (417 kg/m³) and outer (466 kg/m³) heartwood, mean age 42 ± 2 years
- tests based on EN 350-1, basidiomycetes: *Poria placenta*, *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* (only 1st series), *Coriolus versicolor* (only 2nd series)

Results

- relevant fungus *P. placenta* caused 16-19 % mass loss; derived durability class 4 (less durable), differences between inner and outer heartwood corrected mass losses
- fungal growth–area and –density correspond to mass losses caused by *P. placenta* and *C. puteana*
- rather poor correlation of mass loss and density

Biochemistry

sample	Taxifolin content [%]			corrected mass loss
	sound sample	degraded sample	fungus	
1511	0.1	0.1	<i>C. puteana</i>	13.4
2321	1.7	0.5	<i>C. puteana</i>	13.3
1221	0.7	0.2	<i>C. puteana</i>	9.3
1321	1.1	0.5	<i>C. puteana</i>	3.4
2111	1.6	0.5	<i>C. puteana</i>	2.9
1212	0.6	0.3	<i>P. placenta</i>	21.8
2522	1.4	0.8	<i>P. placenta</i>	19.6
2212	1.5	0.5	<i>P. placenta</i>	17.6
1112	0.6	0.5	<i>P. placenta</i>	16.3
2322	1.7	1.1	<i>P. placenta</i>	13.1

Table 1: Taxifolin content [%] of sound samples and degraded samples with regard to corrected mass losses [%] by *C. puteana* and *P. placenta*.

Experimental

- accelerated solvent extraction (ASE) of both sound samples and degraded samples with petroleum ether, acetone/water (9/1), ethanol/water (8/2) and water
- high performance liquid chromatography (HPLC) of acetone/water fraction at 280 nm to determine taxifolin content

Analytical results

- more extractives in acetone/water fraction of wood degraded by *P. placenta* than of wood degraded by *C. puteana* and of sound samples
- activity of *C. puteana* inhibited by taxifolin (DHQ) but ability to decompose this compound (up to 70 %)
- *P. placenta* less affected resulting always in high mass losses

Topochemical results

- conclusive differences between degraded late- and earlywood UV-absorbance
- degradation of predominantly cellulose resulting in relative high amount of lignin (Fig. 2b) compared to sound wood (Fig. 2a)
- no correlation was found between absorbance and mass loss due to the small UMSP sample volume of 0.001 mm³

Experimental

- embedding of degraded samples from natural durability test and adjacent sound samples in epoxy resin, sections by ultra microtome (1 μm)
- UV microspectrophotometry (UMSP) area scanning (280 nm) for topochemical distribution of lignin

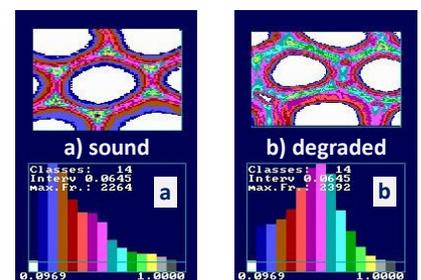


Figure 2: UV-absorbance [-] in cross sections and histograms. (a) Sound inner heartwood latewood, mean absorbance = 0.30. (b) Degraded (*P. placenta*) inner heartwood latewood, mean absorbance = 0.42, corrected mass loss = 17.6 %.

Summary

Douglas fir heartwood from four sites in Southern Germany is characterized by a low natural durability (DC 4) derived from mass losses evoked by *Poria placenta*. Topochemistry showed the selective degradation of cell wall components by brown rot fungi, while analytical chemistry allows conclusions on the different fungicidal effect of taxifolin on basidiomycetes.

NATURAL DURABILITY OF DOUGLAS FIR (*PSEUDOTSUGA MENZIESII*) HEARTWOOD GROWN IN SOUTHERN GERMANY

Blohm, J.H.¹; Melcher, E.²; Lenz, M.T.³; Koch, G.⁴ & Schmitt, U.⁵

ABSTRACT

The natural durability of timber is an important property in order to assess the performance in service. For numerous species grown in primary forests, this property was already determined. As plantation-grown timber becomes more and more important, more detailed information on their properties is urgently needed, because increasing amounts of this material are coming to the market. The majority of planted Douglas fir trees (*Pseudotsuga menziesii*) in Germany are approximately 40 years old or some years older. In the present study, representative material of ten trees from two different sites in the south of Germany was investigated with regard to its natural durability. In laboratory tests based on EU standard EN 113, inner and outer heartwood zones were exposed to basidiomycetes. Density measurements were additionally used for further characterization of this material.

First results showed a lower durability of the plantation-grown Douglas fir wood as compared with those from natural sites. Significant differences for both durability and density were found between inner and outer heartwood, even though no correlation was recognized. For a better understanding of durability variations, chemical, topochemical and electron microscopic studies are needed.

Keywords: Durability, Douglas fir, heartwood, utilization

¹ Corresponding author, Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstr. 91 d, 21031 Hamburg, Germany, phone: +49 40 739 62 415, e-mail: jan.blohm@ti.bund.de

² Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstr. 91 d, 21031 Hamburg, Germany, phone: +49 40 739 62 442, e-mail: eckhard.melcher@ti.bund.de

³ Department of Wood Science, University of Hamburg, Leuschnerstr. 91 d, 21031 Hamburg, Germany, phone: +49 40 739 62 437, e-mail: marie-therese.lenz@uni-hamburg.de

⁴ Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstr. 91 d, 21031 Hamburg, Germany, phone: +49 40 739 62 410, e-mail: gerald.koch@ti.bund.de

⁵ Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstr. 91 d, 21031 Hamburg, Germany, phone: +49 40 739 62 400, e-mail: uwe.schmitt@ti.bund.de

INTRODUCTION

Due to good wood properties of naturally grown Douglas fir from western North America, this species was introduced to Europe in the second half of the 19th century. Plantations were first established hundred years later (Kownatzki et al. 2011) with currently about 2 % of total area in Germany planted with Douglas fir (Polley et al. 2009). Following increasing acceptance and use of Douglas fir, the question for wood properties of regionally grown material arose. Earlier studies gave a general description (Sauter 1992, Göhre 1958) and some information on the natural durability from laboratory (Augusta 2007) and outdoor tests (Rapp et al. 2010).

In the present study, based on EU standards, laboratory tests with basidiomycetes were carried out to find out more about plantation grown Douglas fir and its natural durability with special emphasis on a comparison between inner and outer heartwood.

MATERIAL AND METHODS

Material

Growth medium

A mixture of 4 % malt extract and 2 % agar was diluted in tap water of hardness 0.41–0.78 mg/L CaO to provide growth conditions suitable for the basidiomycetes.

Basidiomycetes

All the three basidiomycetes involved in the laboratory tests were brown rot fungi recommended in the standards EN 113 (1) and EN 350-1 (2 and 3):

- 1 *Coniophora puteana* (Schumacher ex Fries), Karsten (Stamm BAM Ebw. 15),
- 2 *Poria placenta* (Fries), Cooke sensu J. Eriksson (Stamm FPRL 280) and
- 3 *Gloeophyllum trabeum* (Persoon ex Fries), Murrill, (Stamm BAM Ebw. 109).

By transferring small pieces of older mycelium in petri dishes filled with growth medium, active mycelium was cultivated. In sterile environment, special jars filled with 60 ml of growth medium were overgrown by the different basidiomycetes inoculated.

Wood

The ten investigated 42-44 year old Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) trees came from the neighbored (15 km) forest districts of Lörrach and Kandern in the southwest of Germany. Five trees from each of the sites represented the manifold plantation constellations i.e. number of individuals per hectare and varying spacings. Samples were sawn out of core planks from stem heights between 1.35 to 3.35 m. At the lower end of this segment, disks showed radii from 15 to 26 cm (Figure 1) – as the age of the trees was almost similar, growth-ring widths ranged from 0.3 to 12.1 mm. For a comprehensive characterization of the heartwood, an inner and an outermost heartwood zone were defined as follows:

- inner heartwood was taken from the 5th growth ring outwards, while
- outer heartwood was taken from areas close to the transition to sapwood inwards.

In total, 440 Douglas fir heartwood samples were investigated:

- 360 with fungal attack (WF): 3 different fungi x 6 parallels each x 2 sites x 5 trees each x 2 zones (inner and outer heartwood),
- 40 humidity controls (HC): 2 samples for each zone to calculate the oven-dry weight of samples with fungal attack,
- 40 samples without fungal attack (NF): 2 samples for each zone as blank tests to determine a correction of weight, if there was any.

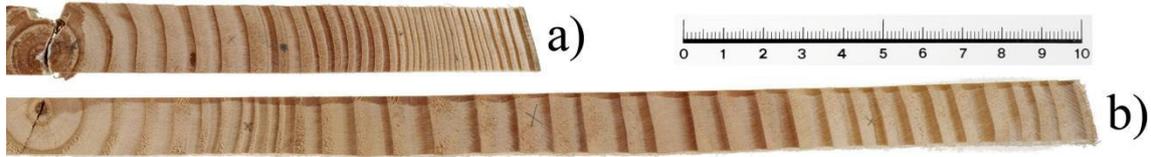


Figure 1. Wide range of radii involved in the investigations. Scale represents 10 cm.

Additional 30 Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood references (R) were treated similarly to samples with fungal attack to be related with the weight loss for Douglas fir. Sample measurements were 50 ± 0.5 (l) x 25 ± 0.5 (r) x 15 ± 0.5 (t) mm³ at 12 % moisture content. Inhomogeneity, like for example cracks, discolorations and branches were excluded. Radial and tangential sides of the samples had to be parallel to the grain and growth rings running tangential to radial sides were not allowed.

Methods

Laboratory tests were carried out based on EN 113:1996/prA1: 2003 in combination with EN 350-1: 1994. All Douglas fir samples were conditioned in a climatic chamber (20 ± 2 °C / 65 ± 5 % rH) for four weeks. Thereafter, climate weights of all samples and climate volumes of the humidity controls were determined. Subsequently, humidity controls and Scots pine sapwood references were oven-dried for 24 hours at 103 ± 2 °C and – after cooling down in desiccators – weighed again to ascertain oven-dry weights. For each zone, oven-dry volume of humidity controls as well as average moisture content u (HC) (Eq. 1) were determined:

$$\overline{u(HC)} = \frac{1}{n} \sum \frac{[m_{u\ climate}(HC) - m_0(HC)]}{m_0(HC)} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

$m_{u\ climate}(HC)$: climate weights of humidity controls [g]
 $m_0(HC)$: oven-dry weights of humidity controls [g]

and the average oven-dry density $\rho_0(HC)$ (Eq. 2)

$$\overline{\rho_0(HC)} = \frac{1}{n} \sum \frac{m_0(HC)}{V_0(HC)} \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad (2)$$

$V_0(HC)$: oven-dry volumes of humidity controls [cm³]

were calculated.

Taking initial weights and determined average moisture contents as a basis, for WF and NF samples theoretical oven-dry weights $m_{0\ theo.}(WF)$ were computed (Eq. 3):

$$m_{0\ theo.}(WF) = \frac{m_{u\ climate}(WF)}{\frac{u(HC)}{100} + 1} \quad [g] \quad (3)$$

$m_{u\ climate}(WF)$: climate weights of samples with fungi attack [g]

To prevent external infections, WF, NF and R samples were packed in polyethylene foil and sterilized by cobalt-60- γ irradiation with an intensity of 31.2 kGy. In sterile environment, two samples per jar were placed on a serrated lock washer to avoid direct moisture transfer from the growth medium. These jars were kept for 16 weeks in a dark chamber at 22 ± 2 °C and 70 ± 5 % rH, whereby jars were not totally closed to guarantee air exchange.

At the end of the test, growth area and growth density were rated. Also special observations, like for example fungi growth by wall contact or external infections were noted. After removal of surface mycelium, the final wet weight of each tested sample was determined. In order to avoid moisture uptake, this had to be done quickly. In the following, all samples were oven-dried, cooled and weighed again for final oven-dry weights. Relating theoretical oven-dry and final oven-dry weight, corrected percentage mass losses $\Delta m_{corrected}(WF)$ were calculated for each WF sample (Eq. 4):

$$\Delta m_{corrected}(WF) = \frac{m_{0\ theo.}(WF) - m_{0\ final}(WF)}{m_{0\ theo.}(WF)} \times 100 \pm \overline{\Delta m(NF)} \quad [\%] \quad (4)$$

$m_{0\ theo.}(WF)$: theoretical oven-dry weight of samples with fungi attack [g]

$m_{0\ final}(WF)$: final oven-dry weight of samples with fungi attack [g]

$\Delta m(NF)$: percentage average mass loss of samples without fungi attack [%]

Average mass losses of all Douglas fir heartwood zones were calculated and set in relation (Eq. 5) to the corresponding average mass loss determined for the references. By means of resulting x-values, according to EN 350-1: 1994 Table 3, the durability class for each zone was defined.

$$x\ value = \frac{\overline{\Delta m_{corrected}(WF)}}{\overline{\Delta m(R)}} \quad [-] \quad (5)$$

RESULTS AND DISCUSSION

Density measurement

Analyses of the 40 representative humidity controls revealed an average oven-dry density of 436 ± 43 kg/m³. Further evaluation of the selected zones showed a significant difference in oven-dry density between inner (412 ± 32 kg/m³) and outer (461 ± 36 kg/m³) heartwood. Contrary, Göhre (1958) and Sauter (1992) found higher oven-dry densities of 524 resp. 504 – 536 kg/m³ for Douglas fir also grown in southern Germany.

Natural durability

In accordance to EN 113, results of the laboratory tests were validated: attacking the reference pine samples, each of the fungi reached average corrected mass losses above 20 %. For Douglas fir, independent of the heartwood zones *G. trabeum* achieved 5.6 % average corrected mass loss, *C. puteana* 9.3 %, and *P. placenta* 17.8 %. The latter caused the highest amount of decay and was therefore relevant for classification. As for all fungi significant differences ($p < 0.1$ %) between inner and outer heartwood zones (Figure 2) were found, for *P. placenta* first separate x-values for inner (x-value 0.75) and outer heartwood (x-value 0.69) were determined. With an overall x-value of 0.72, Douglas fir heartwood (inner and outer) was classified as less durable (DC 4) (EN 350-1: 1994 Table 3). Augusta (2007) and Rapp et al. (2010) presented similar findings so that the classification made in EN 350-2: 1994 could be confirmed. However, Dünisch et al. (2009) recorded for adult heartwood of *Robinia pseudoacacia* a higher durability class than for juvenile heartwood. Although some age-related anatomical characteristics such as decreasing ring widths were observed in Douglas fir (Figure a), the durability classes between inner and outer heartwood were not differing like in Robinia.

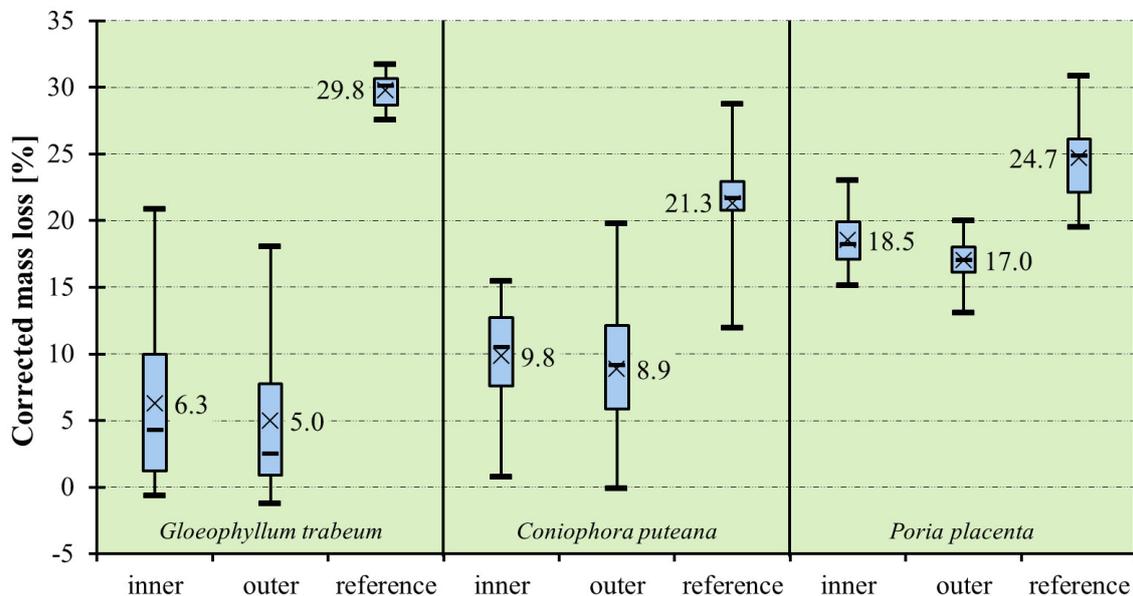


Figure 2. Corrected mass loss [%] on Douglas fir inner and outer heartwood and Scots pine sapwood references. Values: average, negative outliers through blank test correction terms. Each Douglas fir / Scots pine boxplot represents 60 resp. 10 samples.

When comparing trees from different sites, (high) significant differences in corrected mass loss occurred only for *G. trabeum*. This fungus caused minor mass losses, so attempts at site-wise evaluation were considered as less rewarding. No correlations between density and x-value (Rehbein & Koch 2010) were found for *C. puteana* and *G. trabeum*, while *P. placenta* had at least a coefficient of determination of 46 %.

SUMMARY AND OUTLOOK

First results indicated that natural durability of heartwood from plantations-grown Douglas fir trees is less durable (DC 4), whereby density could not serve as an indicator of natural durability. Possibly, natural durability may correlate with other anatomical parameters, e.g. growth-ring widths. Nevertheless, the most promising attempt is the

determination of the amount and distribution of the flavonoid taxifolin, an extractive and active ingredient responsible for durability (Kennedy 1956). Future studies will additionally include material from two other sites and also decay experiments with white rot fungi. Independent of further biological tests, information on the treatability is necessary.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by the Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (Project No. 22037111). The authors are also grateful to the Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, for providing the Douglas fir trees, Christina Waitkus for excellent photographic support and Matthias Höpken for precise sample preparation.

REFERENCES

- Augusta, U. 2007. Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg.
- DIN EN 113: 1996/prA1: 2003, August 2003: Holzschutzmittel. Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzerstörende Basidiomyceten.
- DIN EN 350: 1994, Oktober 1994: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz.
- Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz.
- Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa.
- Dünisch, O., Richter, H.G., Koch, G. 2009. Wood properties of juvenile and mature heartwood in *Robinia pseudoacacia* L. Wood Science and Technology 44: 301–313.
- Göhre, K. 1958. Die Douglasie und ihr Holz. Akademie-Verlag, Berlin.
- Kennedy, R.W. 1956. Fungicidal toxicity of certain extraneous components of Douglas-fir heartwood. Forest Products Journal 6: 80–84.
- Kownatzki, D., Kriebitzsch, W.U., Bolte, A., Liesebach, H., Schmitt, U., Elsasser, P. 2011. Zum Douglasienanbau in Deutschland. Landbauforschung/ vTI Agriculture and Forestry Research. Special Issue 344.
- Polley, H., Henning, P., Kroiher, F. 2009. Ergebnisse einer Kohlenstoffinventur auf Bundeswaldinventur-Basis. Baumarten, Altersstruktur und Totholz in Deutschland. Allgemeine Forst Zeitschrift 64 (20): 1074–1075.
- Rapp, A.O., Augusta, U., Brandt, K., Melcher, E. 2010. Natürliche Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten. Ergebnisse aus acht Jahren Feldversuch. In: Wiener Holzschutztage 2010 (ed.). 25.-26.10. Wien, HFA, p. 43–49.
- Rehbein, M., Koch, G. 2010. Wie dauerhaft ist die Sibirische Lärche? Holz-Zentralblatt 136 (34): 847–848.
- Sauter, H.U. 1992. Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wuchsbedingungen. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau, Freiburg.

10 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1	Flächenanteile [%] von Douglasie, Fichte und Kiefer in 20-Jahres-Altersklassen für Deutschland und Baden-Württemberg (BW) nach Zahlen der Bundeswaldinventur 3 (THÜNEN INSTITUT 2014)	13
Abbildung 2	Schematische Darstellung des juvenilen Zylinders, bearbeitet nach RENDELE (1959)	16
Abbildung 3	Schematisches Radialprofil zur juvenilen zu adulten Merkmalen und Holzeigenschaften mit zunehmendem Abstand vom Mark, nach BENDTSEN (1978), angepasst.	19
Abbildung 4	Vorkommen von Douglasien in Trakten (4 km x 4 km) der Bundeswaldinventur 3 (THÜNEN INSTITUT 2014, Karte KROIHER) mit Standorten des untersuchten Holzes.	22
Abbildung 5	Behandlungsabläufe nach KENK & HRADETZKY (1984) mit verschiedenen Eingriffsstärken	24
Abbildung 6	Radius 1 und 2 des gewählten Durchmessers von Baum 122 aus Kandern, sowie minimaler und maximaler Radius. Lineal repräsentiert 10 cm. Aufnahme C. Waitkus, ergänzt.	27
Abbildung 7	Bestimmung des lokalen Mikrofibrillenwinkels [°] der 002-Ebene von kristalliner Zellulose anhand Röntgentransmissions-Pulverdiffraktometrie (aus EVANS 2014). 32	
Abbildung 8	Vergleich der Holzmehle. Abgebaute Probe (links), Kontrollprobe (rechts).	49
Abbildung 9	Lineare Regression zur Bestimmung des Taxifoltingehaltes [mg/ml] von Douglasien-Kernholz Extrakten anhand der Absorption [mAU] bei 210 nm.	51
Abbildung 10	Douglasien-Kernholzproben mit Befall von <i>C. puteana</i> (links) und <i>P. placenta</i> (rechts) zur Betrachtung im Transmissionselektronenmikroskop. Durchmesser der Petrischalen: 10 cm.	52
Abbildung 11	Ausschnitt aus dem lichtmikroskopischen Schnitt des durch <i>P. placenta</i> abgebauten inneren Kernholzes von Baum 122 aus Kandern mit markierten Feldern (rote Boxen) zur UV-Vis-Mikrospektroskopie und anhand der Färbung mit Toluidinblau lichtmikroskopisch identifizierte Zonen des Holzabbaus (grün).	54
Abbildung 12	Verteilung, Mittelwerte und Standardabweichung sowie Ränge nach KRUSKAL & WALLIS (1952) der Länge [µm] langsam und schnell gewachsener Früh- und Spätholztracheiden aus den Beispielen (1) und (2) (Tabelle 15).	60
Abbildung 13	Häufigkeit der Tracheidenlänge [µm] langsam gewachsenen Frühholzes (blau, n = 418) und schnell gewachsenen Frühholzes (rot, n = 425) in Klassen zu 100 µm.	60

Abbildung 14	Korrelation der mittleren Länge der Früh- und Spätholztracheiden [μm] langsam gewachsener Bäume (blau) und schnell gewachsener Bäume (rot) mit je zwei Messpunkten.	61
Abbildung 15	Box-Whisker-Plot zur Darstellung der Länge [μm] langsam und schnell gewachsener Frühholztracheiden aus Beispiel (1). Q 1/2/3/4: 1/2/3/4.Quartil.....	62
Abbildung 16	Mittlere lebensjährliche Frühholzbreite (blau) [mm], Spätholzbreite (rot) [mm] und Jahrringbreite (grün, mit Standardabweichung) [mm] im kambialen Alter [a]. $n_{kA5} = 2, n_{kA6} = 9, n_{kA7} = 15, n_{kA8-41} = 20, n_{kA42} = 15, n_{kA43-44} = 5$	63
Abbildung 17	Korrelation der Jahrringbreite [mm] mit Frühholzbreite (rot, $R^2 = 0,89$) [mm] und Spätholzbreite (blau, $R^2 = 0,49$) [mm]. $n_{\text{Frühholz}} = n_{\text{Spätholz}} = 730$	64
Abbildung 18	Mittlere Jahrringbreite [mm] der Wachstumsmodelle schnell (rot), BHD 40 (grün), schnell-langsam (hellrot), langsam-schnell (hellblau) und langsam gewachsen (blau) im kambialen Alter [a]. $n_{\text{Bäume (Alle Modelle)}} = 4$	65
Abbildung 19	Mittlere Jahrringbreite [mm] der Wachstumsmodelle schnell (rot), Mittel aus BHD 40, schnell-langsam und langsam-schnell (grün, mit Standardabweichung) und langsam (blau) im kambialen Alter [a]. $n_{\text{Bäume (Mittelmodell)}} = 12, n_{\text{Bäume (langsam)}} = n_{\text{Bäume (schnell)}} = 4$	65
Abbildung 20	Identifizierung des juvenilen und adulten Holzes von Baum 19 aus Kandern. Links: Eintritt in die adulte Phase im 15. Lebensjahr, bestimmt durch segmentierte lineare Regression mit Sprung (grün, $R^2 = 83 \%$, Summe kleinster Quadrate: 1573). Rechts: Eintritt in die adulte Phase im 18. Lebensjahr, bestimmt durch segmentierte lineare Regression (rot, $R^2 = 80 \%$, Summe kleinster Quadrate: 1837).....	67
Abbildung 21	Darstellung des radialen Ausmaßes [mm] von Kern- und Splintholz, juvenilem und adultem Holz sowie juvenilem und adultem Kernholz und adultem Splintholz von Baum 19 aus Kandern.	68
Abbildung 22	Mittlerer lebensjährlicher Spätholzanteil [%] der Wachstumsmodelle schnell (rot), BHD 40 (grün), schnell-langsam (hellrot), langsam-schnell (hellblau) und langsam gewachsen (blau) im kambialen Alter [a]. $n_{\text{Bäume (alle Modelle)}} = 4$	69
Abbildung 23	Mittlerer lebensjährlicher Spätholzanteil [%] der Wachstumsmodelle schnell (rot), Mittel aus BHD 40, schnell-langsam und langsam-schnell (grün, mit Standardabweichung) und langsam (blau) im kambialen Alter [a]. $n_{\text{Bäume (Mittelmodell)}} = 12, n_{\text{Bäume (langsam)}} = n_{\text{Bäume (schnell)}} = 4$	69
Abbildung 24	Mittlere Jahrringbreite (grün, mit gleitendem Durchschnitt von fünf Vorjahren) [mm] und mittlerer Spätholzanteil (rot, mit gleitendem Durchschnitt von fünf Vorjahren) [%] von älteren Bäumen in Kalenderjahren [A.D.]. $n_{\text{Bäume}} = 4$	70

- Abbildung 25** Absolute Häufigkeit (grün, $n = 4207$) [-] und kumulierte Häufigkeit (rot) [%] der Tracheidenlänge [μm] aus mark- und splintnahen Kernholzbereichen in 20 μm -Klassen mit Mittelwert (Raute) und Standardabweichung (Punkte)..... 71
- Abbildung 26** Mittlere Tracheidenlänge des Spätholzes (rot, $R^2 = 0,88$), des Frühholzes (blau, $R^2 = 0,83$) und anteilig gewichtet der Jahrringe (grün, $R^2 = 0,87$) [μm] und logarithmische Regressionen im kambialen Alter [a]. Anzahl der repräsentierten Jahrringe für Messpunkte lebensjähriger Werte: $n_{kA9} = 2$, $n_{kA10} = 6$, $n_{kA11} = 7$, $n_{kA12} = 4$, $n_{kA13} = 1$, $n_{kA23} = 1$, $n_{kA27} = 1$, $n_{kA28} = 5$, $n_{kA29} = 3$, $n_{kA30} = 5$, $n_{kA31} = 1$, $n_{kA32} = 1$, $n_{kA33} = 3$ 72
- Abbildung 27** Tracheidenwanddicke [μm], lebensjährliche Tracheidenwanddicke (schmal gestrichelt) [μm] und segmentierte lineare Regression (breit gestrichelt, $R^2 = 0,86$) [μm] mit Abstand vom Mark [mm] von Baum 222 aus Kandern. Anhand des Merkmals Tracheidenwanddicke identifizierter Eintritt in die adulte Phase im 13. Lebensjahr (Pfeil)..... 74
- Abbildung 28** Mittlere Tracheidenwanddicke [μm] und mittlere gewichtete Tracheidenlänge [μm] des juvenilen Holzes (leere Punkte, $n = 20$) und adulten Holzes (gefüllte Punkte, $n = 20$)..... 75
- Abbildung 29** Radiale (blau) und tangentiale (rot) Tracheidendurchmesser [μm] mit zunehmendem Abstand zum Mark [mm] von Baum 94 aus Ehingen. Rote Hervorhebung: Vergleich der Änderung der radialen und tangentialen Durchmesser anhand der Steigung. 77
- Abbildung 30** Mittlere radiale Tracheidendurchmesser und Standardabweichung (blau) [μm], mittlere tangentiale Tracheidendurchmesser und Standardabweichung (rot) [μm] im kambialen Alter und globale Mittelwerte bei Ortsauflösung 25 μm (gestrichelt, Farben entsprechend). 78
- Abbildung 31** Mikrofibrillenwinkel [$^\circ$], lebensjähriger Mikrofibrillenwinkel (schmal gestrichelt) [$^\circ$] und segmentierte lineare Regression (breit gestrichelt, $R^2 = 0,97$) [$^\circ$] mit Abstand vom Mark [mm] von Baum 66 aus Löwenstein. Anhand des Merkmals Mikrofibrillenwinkel identifizierter Eintritt in die adulte Phase im 25. Lebensjahr (roter Pfeil). Erste Durchforstung (grüner Pfeil)..... 79
- Abbildung 32** Rohdichte [kg/m^3], lebensjährliche Rohdichte (schmal gestrichelt) [kg/m^3] und segmentierte lineare Regression (breit gestrichelt, $R^2 = 0,43$) [kg/m^3] bei Holzfeuchte um 7 % mit Abstand vom Mark [mm] von Baum 184 aus Löwenstein. Anhand des Merkmals Rohdichte identifizierter Eintritt in die adulte Phase im 21. Lebensjahr (Pfeil). 81
- Abbildung 33** Mittlere Rohdichte und Standardabweichung des juvenilen Holzes (gelb) [kg/m^3 , $u \sim 7\%$], mittlere Rohdichte und Standardabweichung des adulten Holzes (grün) [kg/m^3 , $u \sim 7\%$], mittlerer Spätholzanteil (rot) [%] und Anzahl der Jahrringe von

- juvener und adulter Rohdichte (Balken, Farben entsprechend, $n_{LJ5} = 2$, $n_{LJ6} = 9$, $n_{LJ7} = 15$, $n_{LJ8} = 19$, $n_{LJ42} = 15$, $n_{LJ43-44} = 5$) mit kambialem Alter [a]..... 82
- Abbildung 34** Mittlere Rohdichte [kg/m^3], mittlerer Spätholzanteil (lang gestrichelt) [%] und mittlere Tracheidenwanddicke (kurz gestrichelt) [m^{-5}] der Wuchsmodelle langsam (blau) und schnell (rot) mit kambialem Alter [a]. 83
- Abbildung 35** Druckfestigkeiten [N/mm^2] und Druck-Elastizitätsmoduln [N/mm^2] von innerem juvenilem Kernholz ($n = 80$), äußerem juvenilem Kernholz ($n = 50$) und adultem Kernholz ($n = 30$). 87
- Abbildung 36** Mittlere Spannung [N/mm^2] und mittlere Verformung (Kompression) [mm] der Kollektive adultes Kernholz (grün, $n = 30$), äußeres juveniles Kernholz (rot, $n = 50$) und inneres juveniles Kernholz (gelb, $n = 80$). Rundungen: Spannung 0,1 N/mm^2 , Verformung 1 μm 88
- Abbildung 37** Charakteristische Bruchfläche eines Biegeprüfkörpers (Festigkeit 126 N/mm^2 , Elastizitätsmodul 16 kN/mm^2) aus dem äußeren juvenilen Kernholz. a) Querschnittsübersicht mit auf Zug (Pfeil oben) und Druck (Pfeil unten) belasteten Zonen, Messbalken entspricht 5 mm. b) Zugzonendetail mit glatt gebrochenem Frühholz und langfaserig hervorstehendem Spätholz, Messbalken 3 mm. c) Druckzonendetail mit weniger glatter Frühholzoberfläche und gestauchtem Spätholz, Messbalken 3 mm. 89
- Abbildung 38** Biegefestigkeiten [N/mm^2] und Biege-Elastizitätsmoduln [N/mm^2] von innerem juvenilem Kernholz ($n = 48$), äußerem juvenilem Kernholz ($n = 30$) und adultem Kernholz ($n = 18$). 90
- Abbildung 39** Mittlere Kraft [N] und mittlere Verformung [mm] der Kollektive adultes Kernholz (grün, $n = 18$), äußeres juveniles Kernholz (rot, $n = 30$) und inneres juveniles Kernholz (gelb, $n = 48$). Rundungen: Kraft 10 N, Durchbiegung 10 μm 91
- Abbildung 40** Mittlerer Biege-Elastizitätsmodul und Standardabweichung des juvenilen Holzes (gelb) [kN/mm^2], mittlerer Elastizitätsmodul und Standardabweichung des adulten Holzes (grün) [kN/mm^2], mittlere Rohdichte (hellrot, gepunktet) [kg/m^3 , $u \sim 7\%$], mittlerer Spätholzanteil (dunkelrot, gestrichelt) [%], mittlerer Mikrofibrillenwinkel (blau, gestrichelt) [$^\circ$] und Anzahl der Jahrringe von juveniler und adulter Rohdichte (Balken, Farben entsprechend, $n_{kA5} = 2$, $n_{kA6} = 9$, $n_{kA7} = 15$, $n_{kA8} = 19$, $n_{kA42} = 15$, $n_{kA43-44} = 5$) mit kambialem Alter [a]. 94
- Abbildung 41** Bruchschlagarbeit (links) [kJ/m^2] und Rohdichte bei $u \sim 13\%$ (rechts) [kg/m^3] der drei Teilkollektive juvenilen und adulten Kernholzes. 95
- Abbildung 42** Charakteristische Bruchfläche eines kurzfaserig gebrochenen Prüfkörpers zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit (25 kJ/m^2) aus dem äußeren juvenilen Kernholz. a) Querschnittsübersicht mit Jahrringgrenze: Das Frühholz (oberer Bildrand,

- unscharf) ist kurzfasrig gebrochen, auch das marginale Spätholz (unterer Bildrand) eher kurzfasrig gebrochen, Messbalken entspricht 5 mm. b) Detail der Jahrringgrenze mit geringem longitudinalen Unterschied in der Ausrisstiefe des Spätholzes, Messbalken 1 mm. c) Tangentiales Detail eines hervorstehenden Tracheidenbündels des Spätholzes, Messbalken 4 mm. 96
- Abbildung 43** Mittleres longitudinales, radiales bzw. tangenciales lineares Quellmaß [%] und Volumenquellmaß [%] des äußeren Kernholzes (grün, n = 40) und inneren Kernholzes (rot, n = 40) sowie des Mittelwertes beider Bereiche (blau, n = 80) bei aus Klimabedingungen 20 °C und 0 / 35 / 65 / 85 % relativer Luftfeuchte resultierenden mittleren Holzfeuchten [%]. 100
- Abbildung 44** x -Werte [-] der Prüfkörper inneren und äußeren Douglasien-Kernholzes, hervorgerufen durch *P. placenta* und *C. puteana* (jeweils n = 120) sowie *C. versicolor* und *G. trabeum* (jeweils n = 60) bei 16-wöchiger Exposition. Negative x -Werte durch Korrekturterm aus den Prüfkörpern ohne Basidiomycetenangriff. Dauerhaftigkeitsklassen (lang gestrichelte Abgrenzungen): 1 – sehr dauerhaft, 2 – dauerhaft, 3 – mäßig dauerhaft, 4 – wenig dauerhaft, 5 – nicht dauerhaft. 103
- Abbildung 45** x -Werte [-] der Prüfkörper inneren und äußeren Kernholzes aus dem Standraumversuch (n = 12), des inneren und äußeren Kernholz älterer Baume aus Kandern (n = 24) und eines *Oregon Pine*-Brettes (n = 6), hervorgerufen durch *P. placenta* und *C. puteana* bei 8-wöchiger Exposition. Dauerhaftigkeitsklassen (lang gestrichelte Abgrenzungen): 1 – sehr dauerhaft, 2 – dauerhaft, 3 – mäßig dauerhaft, 4 – wenig dauerhaft, 5 – nicht dauerhaft. 104
- Abbildung 46** Bewuchs von Douglasienprüfkörpern durch *C. puteana* (links) und *P. placenta* (rechts) nach 16-wöchiger Exposition. Maß der langen Kante der Prüfkörper: 50 mm. Aufnahmen: C. Waitkus. 105
- Abbildung 47** Durch *C. puteana* abgebaute Proben des äußeren Kernholzes eines der älteren Bäume aus Kandern; mittlerer x -Wert 0,07. Masseverluste: 61211: 0 %, 61212: 0,3 %, 61213: -0,1 %, 61214: 3,4 %, 61215: -0,2 % und 61216: 13,3 %. Prüfkörperkanten entsprechen 30 mm. 107
- Abbildung 48** Aceton/Wasserextrakte [%] von Kontrollproben (blau, n = 10) und durch *P. placenta* und *C. puteana* abgebauten Proben (rot, $n_{pp} = n_{cp} = 5$) und Masseverluste der abgebauten Proben [%]. 108
- Abbildung 49** Vergleich der UV-Absorption [-] bei 280 nm zwischen Spätholz-Scanning-Feldern repräsentativer Proben. Linke Spalte: Abgebaute Probe, mittlere UV-Absorption 0,42. Rechte Spalte: Entsprechende Kontrollprobe, mittlere UV-Absorption 0,37. a-b) Gescannte Zellen mit farblich skaliertes UV-Absorption [-]. c-d) Absolute und kumulierte Häufigkeiten der Messpunkte in UV-Absorptionsklassen [-]. e-f) UV-

	Absorptionen [-] in a-b markierter Zellwände und Mittellamellen. g-h) Dreidimensionale Darstellung der UV-Absorption [-] nach Skala aus a-b.....	110
Abbildung 50	Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahmen durch <i>P. placenta</i> attackierten Douglasien-Kernholzes nach dreiwöchiger Exposition. a) Bohrrhyph beim Durchwachsen enzymatisch aufgelöster Sekundärwandschichten, Messbalken 2 µm b) Frühes Befallsstadium einer an der Tertiärwand anliegenden Hyphe mit Schleimschicht bei optisch intakter Zellwand, Messbalken 2 µm.	113
Abbildung 51	Mittlerer Anteil juvenilen Holzes an der Radiusbreite in Brusthöhe [%], identifiziert anhand der Merkmale Spätholzanteil (orange, $R^2 = 0,83$), Tracheidenwanddicke (weinrot, $R^2 = 0,20$), Rohdichte (blau, $R^2 = 0,86$) und Mikrofibrillenwinkel (grün, $R^2 = 0,82$) in Abhängigkeit vom Standraum [%]. $n_{2,5 \text{ m}^2} = 3$ Bäume, $n_{5 \text{ m}^2} = 7$ Bäume, $n_{10 \text{ m}^2} = 6$ Bäume und $n_{20 \text{ m}^2} = 4$ Bäume.....	114
Abbildung 52	Anteil juvenilen bzw. adulten Kern- sowie Splintholzes an der Radiusbreite [%] der 20 untersuchten Bäume ermittelt anhand der Merkmale Rohdichte, Tracheidenwanddicke Spätholzanteil und Mikrofibrillenwinkel.	115
Abbildung 53	Zur Untersuchung ausgewählte Radien der 20 Bäume aus dem Standraumversuch. Lineal entspricht 10 cm. Aufnahmen C. Waitkus, ergänzt.	139
Abbildung 54	Mittlerer Spätholzanteil [%] mit dem kambialen Alter [a]. Pfeil : Eintritt in die adulte Phase. Wachstumsmodelle (Spalten): LS: langsam-schnell S: schnell BHD 40: Brusthöhen-Durchmesser 40 cm L: langsam SL: schnell-langsam	140
Abbildung 55	Mittlere Tracheiden-wanddicke [µm] mit dem kambialen Alter [a]. Pfeil : Eintritt in die adulte Phase. Wachstumsmodelle (Spalten): LS: langsam-schnell S: schnell BHD 40: Brusthöhen-Durchmesser 40 cm L: langsam SL: schnell-langsam	141
Abbildung 56	Mittlerer Mikrofibrillenwinkel [°] mit dem kambialen Alter [a]. Pfeil : Eintritt in die adulte Phase. Wachstumsmodelle (Spalten): LS: langsam-schnell S: schnell BHD 40: Brusthöhen-Durchmesser 40 cm L: langsam SL: schnell-langsam	142
Abbildung 57	Mittlere Dichte [kg/m ³] mit dem kambialen Alter [a]. Pfeil : Eintritt in die adulte Phase. Wachstumsmodelle (Spalten): LS: langsam-schnell S: schnell BHD 40: Brusthöhen-Durchmesser 40 cm L: langsam SL: schnell-langsam	143

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht der mit Douglasien bestandenen Flächen [ha] europäischer Gebiete. ^b Inventurdaten, ^s Schätzung, * zitiert aus HERMANN & LAVENDER (1999).....	12
Tabelle 2	Varianten des Douglasien-Standraumversuches, Pflanzzahlen pro Hektar [n/ha] und Wuchsraum je Pflanze [m ²]. Durchgezogene Umrandung: favorisiert anzulegende Felder, gestrichelte Umrandung: Mischwald-Felder.....	21
Tabelle 3	Standorte des untersuchten Materials, nach KENK & WEISE (1983), ergänzt um den Standort Kandern (persönliche Mitteilung ŠEHO, M. (10.12.2012): Information zur Versuchsfläche Dgl 96 (Fbz. Kandern, Staatswald 5/24), Kopie).....	23
Tabelle 4	Pflanzverband [m ²], Standraum [m ²], Wuchsmodell, Brusthöhendurchmesser ohne Rinde (BHD o. R.) [cm], Abholzigkeit [cm/m] und Durchforstungsjahre der Bäume aus dem Standraumversuch. Wuchsmodelle: BHD 40 – Brusthöhendurchmesser 40 cm, LS – langsam-schnell, S – schnell, SL – schnell-langsam, L – langsam.....	25
Tabelle 5	Untersuchte Radien (fett) [cm] der 20 Bäume aus dem Standraumversuch mit Abweichungen der Ausrichtung [°] und des Durchmessers [cm] zu Nord-Mark-Durchmessern.	29
Tabelle 6	Zur Bestimmung der Druckfestigkeit, Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit ausgewählte Bäume, Durchmesser [cm] und Parallelenanzahl.	34
Tabelle 7	Prüfparameter zur Bestimmung von Festigkeit und Elastizitätsmodul bei Druck- und Biegebelastung.....	35
Tabelle 8	In den Laborprüfungen zur natürlichen Dauerhaftigkeit verwendete Prüfkörper aus innerem und äußerem Douglasien-Kernholz und Referenzprüfkörper aus <i>Pinus sylvestris</i> (<i>Ps</i>), <i>Fagus sylvatica</i> (<i>Fs</i>).....	41
Tabelle 9	Bonitierung des Bewuchses der Probenmantelfläche [%] und der Dichte des Mycels [deskriptiv].....	43
Tabelle 10	Klassen der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz gegen Befall durch Basidiomyceten aufgrund von Laborprüfungen auf der Basis von DIN 113 (1996/prA1 2003).	44
Tabelle 11	Prüfkörper für die verkürzte Prüfung der natürlichen Dauerhaftigkeit.....	46
Tabelle 12	Proben zur beschleunigten Flüssigextraktion, ausgewählt nach durch Basidiomyceten hervorgerufenen Masseverlusten [%]. Neben abgebauten Proben wurden intakte Parallelproben untersucht.	48
Tabelle 13	Programm der beschleunigten Flüssigextraktion. Geradzahlige Schritte sind Reinigungsschritte.	50
Tabelle 14	Konzentrationsgradient und Fluss [ml/min] der Eluenten Phosphorsäure (0,001 M) [%] und Acetonitril [%].....	51

Tabelle 15	Werteübersicht für die Beispiele (1): Langsam und schnell gewachsene Frühholztracheiden und (2): Langsam und schnell gewachsene Spätholztracheiden.....	62
Tabelle 16	Eigenschaften anhand des Merkmals Spätholzanteil identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.....	68
Tabelle 17	Eigenschaften anhand des Merkmals Tracheidenwanddicke identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.....	75
Tabelle 18	Eigenschaften anhand des Merkmals Mikrofibrillenwinkel identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.....	80
Tabelle 19	Eigenschaften anhand des Merkmals Rohdichte identifizierten juvenilen und adulten Holzes sowie Kern- und Splintholz-Teilkollektiven.....	84
Tabelle 20	Rechnerische Zuordnung geprüfter äußerer Kernholzbereiche zum juvenilen bzw. adulten Kernholz.	85
Tabelle 21	Eigenschaften nach DIN 4074-1 (2003), Kriterium mittlere Jahringbreite sortierter fehlerfreier Prüfkörper.	93
Tabelle 22	Mittleres longitudinales (L), radiales (R), bzw. tangenciales (T) lineares Quellmaß [%] und Volumenquellmaß [%] des inneren (n = 40) und äußeren Kernholzes (n = 40) bei aus Klimabedingungen 20 °C und 0 / 35 / 65 / 85 % relativer Luftfeuchte resultierenden mittleren Holzfeuchten (u) [%].....	98
Tabelle 23	Mittlere Masseverluste [%] hervorgerufen durch <i>C. puteana</i> , <i>P. placenta</i> , <i>G. trabeum</i> und <i>C. versicolor</i> an Referenzprüfkörpern (n = 10) aus <i>P. sylvestris</i> -Splintholz und <i>F. sylvatica</i> in verschiedenen Prüfungen.	102
Tabelle 24	Bewuchsfläche und –dichteklassen und mittlere α -Werte [-] des Holzabbaus durch <i>C. puteana</i> und <i>P. placenta</i>	106
Tabelle 25	Mittlere UV-Absorption [-] der Scanning-Felder abgebauter Proben (n = 60) und der Scanning-Felder angrenzender Kontrollproben (n = 60), unterschieden nach Früh- und Spätholz und lichtmikroskopischen Befunden zum Holzabbau.	111
Tabelle 26	Mittelwerte und Standardabweichungen [%] der Eigenschaften des juvenilen und adulten Holzes der 20 untersuchten Bäume.....	116
Tabelle 27	Biege-Elastizitätsmodul korrelationsgewichtete Abgrenzung juvenilen und adulten Holzes.	144

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

.....

.....

jan-henning blohm