



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5878

**Untersuchungen zur
lastgesteuerten
Festigkeitsverteilung
in Bäumen**

A. Zipse

Institut für Materialforschung

Februar 1997

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5878

Untersuchungen zur lastgesteuerten Festigkeitsverteilung
in Bäumen*

Achim Zipse

Institut für Materialforschung

*Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH) genehmigte
Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1997

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

„Untersuchungen zur lastgesteuerten Festigkeitsverteilung in Bäumen“

Zusammenfassung

Nach der Vorstellung des Aufbaus von Bäumen aus biologischer und mechanischer Sicht wird die Ermittlung von Festigkeitskenngrößen an kleinen, fehlerfreien Probekörpern (\varnothing 5 mm Bohrkerne) mit Hilfe des neu entwickelten Fractometer III dargelegt, vorhandenen Normprüfverfahren gegenübergestellt und die Eignung als Meßgerät unter Beweis gestellt. Ausgehend von der Untersuchung der Festigkeitsverteilungen und -relationen an geraden und fehlerfreien Bäumen folgt eine Gegenüberstellung der Festigkeitsverteilungen und -relationen bei Abweichungen der Baumgestalt vom „Normalfall“. Es stellte sich heraus, daß bei geraden und defektfreien Laubbäumen eine Korrelation zwischen radialer Biegefestigkeit und Druckfestigkeit in Faserrichtung vorlag, bei den entwicklungs geschichtlich älteren Nadelbäumen hingegen nicht. Weiter wurde vor allem eine deutliche Abhängigkeit der radialen Biegefestigkeit vom Holzstrahlanteil am Gesamtvolumen festgestellt. Außerdem konnten bei Bäumen mit ähnlichem anatomischem Aufbau (Gefäßanordnung, Holzstrahlanteil) ähnliche Festigkeitsrelationen ermittelt werden und dadurch eine Klassifizierung vorgenommen werden. Aufgrund einer Vielzahl von untersuchten schiefen, hohlen oder gekrümmten Bäumen wurde eine last- und richtungsabhängige Verteilung der Festigkeiten bei Bäumen nachgewiesen. Abschließend wurde mittels der CAIO-Methode die Orientierung der radial im Baumstamm liegenden Holzstrahlen untersucht und die Hypothese einer weitgehend schubspannungsfreien Anordnung entsprechend den Längsfasern formuliert.

„Investigations on the stress controlled strength distribution in trees“

Abstract

After the description of tree anatomy from the biological and the mechanical point of view, the determination of the strength properties on small, faultless samples (\varnothing 5 mm core) with the help of the new developed Fractometer III is shown. Further, the Fractometer measuring technique is compared with the existing standard measuring technique and the suitability of the Fractometer as a measuring instrument is proved.

Coming from the investigation of the strength properties and their relations to each other in straight and faultless trees the strength properties and their relations to each other in trees who deviate from this „normal shape“ are compared.

It was found, that straight and faultless hardwoods possess a correlation between the radial bending strength and the compression strength in fibre direction, however the historical older softwoods don't possess such a connection.

It was evident, that a clear dependence of the radial bending strength on the part of the ray volume on the total volume exists. Further, it could be shown that trees with a similar anatomy (vessel arrangement, part of ray volume) possess similar relations of the measured strength properties and so a classification of trees according to these characteristics was possible.

Because of a lot of investigated leaning, hollow or curved trees a stress controlled strength distribution in trees was proved.

Finally, with the help of the CAIO-method the orientation of the radial arranged rays was investigated. As a result the hypothesis of an arrangement of the rays without shear stresses between them was formulated, corresponding to the arrangement of the fibres.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Aufbau und Mechanik von Bäumen.....	4
2.1.1 Aufbau von Bäumen.....	4
2.1.2 Mechanik von Bäumen.....	11
2.2 Meßgrößen und Methoden.....	4
2.2.1 Versagen und Festigkeitsermittlung von Holz in Faserrichtung.....	17
2.2.2 Versagen und Festigkeitsermittlung von Holz quer zur Faserrichtung.....	19
2.2.3 Die Bestimmung von Festigkeitskenngrößen mit dem Fractometer.....	19
2.2.4 Durchführung der Messungen	25
3 Ergebnisse und Diskussion.....	26
3.1 Einfluß der Probengeometrie bei der Festigkeitsermittlung von Holz.....	26
3.1.1 Druckfestigkeitsprüfung	26
3.1.2 Biegefestigkeitsprüfung quer zur Faserrichtung	41
3.2 Festigkeitsrelationen und Festigkeitsverteilungen in geraden und fehlerfreien Bäumen.....	50
3.3 Spannungsverteilungen in gekrümmten Baumteilen in und quer zur Faserrichtung	71
3.4 Festigkeitsverteilungen in gekrümmten Baumteilen in und quer zur Faserrichtung	75
3.5 Festigkeitsverteilungen in windexponierten Bäumen.....	96
3.6 Festigkeitsverteilungen in hohlen Bäumen.....	99
3.7 Festigkeitsverteilungen im Bereich der Faserknickzone einer Eiche	124
3.8 Festigkeitsverteilungen am Beispiel einer absinkenden Pappel	128
3.9 Simulation der Holzstrahlanordnung mittels der CAIO-Methode.....	131
4 Zusammenfassung.....	133
5 Literatur.....	136

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurde die Suche nach „neuen“ Materialien mit speziell für die jeweilige Aufgabenstellung zugeschnittenen Eigenschaften intensiviert. Die Notwendigkeit hierzu resultiert aus den gestiegenen Anforderungen und dem zunehmenden Konkurrenzkampf in der Industrie. Das gestiegene Umweltbewußtsein in der Bevölkerung ist ein weiterer Grund dafür, daß man heute gezwungen ist der Erforschung und Entwicklung von Werkstoffen und Strukturen mehr Aufmerksamkeit zu widmen.

Auf der Suche nach optimalen Problemlösungen wurden auch Materialien lebender Organismen einbezogen, es entstand dadurch weltweit ein völlig neuer Wissenschaftszweig, die Bionik, eine Symbiose von **Biologie** und **Technik**. Waren die Wissenschaftler in früheren Zeiten meist auf mehreren Gebieten tätig, setzte sich später zunehmend das Spezialistentum durch. Es fand kaum ein interdisziplinärer Austausch von Informationen statt. Ingenieure hielten nicht viel von natürlichen Materialien und Biologen beachteten zuwenig die grundlegende Bedeutung der mechanischen Eigenschaften lebender Organismen im Hinblick auf die Evolutionstheorie. Die Bionik vereint nun diese zwei Wissenschaftszweige in sich und verkörpert Grundlagenforschung und Anwendung in einem. Dabei werden zunächst die biologischen Vorbilder der Natur und deren Problemlösungen erforscht, um sie anschließend in die Technik zu übertragen. Somit besteht der Nutzen der Bionik daraus, einerseits Lösungen für praktische Anwendungen nach Vorbildern der Natur zu finden, andererseits aber auch einen Beitrag zum Verständnis der Evolution zu leisten. Beschäftigt sich die Menschheit erst seit ein paar tausend Jahren mit mechanischen Eigenschaften, so kann die Natur auf einen weitaus größeren Erfahrungsschatz zurückgreifen. Den dort eingesetzten Materialien kam eine entscheidende Bedeutung im Kampf ums Überleben zu. Nachdem die Natur das Leben erfand, bestand eine ihrer ersten Aufgaben darin, Strukturen zu entwickeln, um es zu schützen.

Beispielsweise ist es für manche Tiere überlebensnotwendig, schnell laufen zu können, wozu starke Knochen, Muskulatur und Sehnen notwendig sind. Die Knochen müssen hierbei hohen Belastungen standhalten, also über eine hohe Festigkeit, Lebensdauer und Sicherheit verfügen und trotzdem mit minimalem Gewicht auskommen. Aus diesem Zwang heraus mußten Strukturen entstehen, die den gestellten Anforderungen optimal genügen. So sind auf Biegung belastete Knochen meist dickwandige Röhren, bei denen sich innerhalb des äußeren, massiven und fest gepackten Knochenmaterials (Kortikalis), vor allem an Stellen der Krafteinleitung innere Knochenstrukturen (Spongiosa) befinden. Die eingeleiteten Kräfte werden hierbei von kleinen Knochenbälkchen (Trabekel) übertragen, die sich entsprechend der vorherrschenden Belastungssituation in Richtung der Hauptnormalspannungen ausbilden und damit lediglich Zug- oder Druckkräften ausgeliefert sind (WOLFF, 1869; CURREY, 1984). Die so aufgebauten Knochen erweisen sich als ein optimal an die auftretenden Belastungen angepaßtes Leichtbaudesign der Natur, sowohl bezüglich der äußeren Form als auch der inneren Struktur.

Durch zahlreiche Studien und vergleichende Simulationen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode biologischer Lastträger konnten von MATTHECK (1992a; 1992b) Wachstums- und Gestaltungsprinzipien formuliert werden. Diese wurden auch in Form von Computeralgorithmen zur Form- und Strukturoptimierung in die Technik übertragen (MATTHECK, 1990, 1992a; MATTHECK und BURKHARDT, 1990).

Die durch umfassende Analysen gewonnenen Erkenntnisse über die Baumgestalt und den inneren Aufbau von Bäumen aus biomechanischer Sicht, konnten auch für eine weitere Anwendung in der Praxis nutzbar gemacht werden. MATTHECK entwickelte die VTA-Methode (Visual Tree Assessment) zur Beurteilung der Bruch- und Standsicherheit von Bäumen (MATTHECK und BRELOER, 1994; GERHARDT, 1994). Die VTA-Methode hat sich bereits weltweit verbreitet und im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht bei Bäumen als Stand der Technik Eingang in die deutsche Rechtsprechung gefunden (HÖTZEL, 1996). Ausgangspunkt war sowohl bei den Computeralgorithmen zur Form- und Strukturoptimierung, als auch bei der VTA-Methode die Formulierung des Axioms konstanter Spannung. Dieses besagt, daß biologische Lastträger auf ihrer Oberfläche im zeitlichen Mittel und bei bestimmungsgerechter Belastung weder über- noch unterbelastete Bereiche besitzen. Hierdurch wurde es möglich, bei der eingehenden fachmännischen Baumbegutachtung aufgrund äußerer Symptome, wie Beulen und Rippen, wissenschaftlich fundiert auf innere Defekte, wie Faulhöhlen und Risse zu schließen bzw. kerbspannungsfreie Oberflächen als Optimierungskriterium für mechanisch belastete, dauerfeste Bauteile zu formulieren. Neben der äußeren Optimalgestalt spielt jedoch auch der ideale Werkstoff eine große Rolle.

Eine biomechanische Analyse der inneren Struktur von Bäumen war nun der nächste, folgerichtige Schritt. Die Untersuchungen gingen von dem Gedanken aus, daß bei biologischen Strukturen auf jeder Betrachtungsebene die Prinzipien des Leichtbaus zu erfüllen sind, um im ständigen Wettbewerb der Evolution das wertvolle Material optimal einzusetzen. Die Fragestellung nach mechanischen Gesichtspunkten der inneren Baumstruktur dient dabei nicht nur der Grundlagenforschung oder kommt der besseren Beurteilung von Gefahrenbäumen im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht von Bäumen zugute, sondern ist auch für die technische Verwertbarkeit in Bezug auf Faserverbundwerkstoffe oder „Smart Structures“¹ von Interesse. Die Längsfasern in Bäumen sind zum Beispiel derart angeordnet, daß die gefährlichen Schubspannungen zwischen den Fasern durch die Ausrichtung entlang der Hauptnormalspannungstrajektorien minimiert werden. Hieraus entstand das CAIO-Verfahren (Computer Aided Internal Optimization), das die Faserorientierungsmechanismen biologischer Strukturen auf Faserverbundwerkstoffe überträgt, d.h. die Schubspannungen zwischen den Fasern minimiert (MATTHECK, 1992a; KRIECHBAUM, 1994; TESCHNER und GRÄBE, 1996). Weiter fand ALBRECHT, daß bei Wurzelanläufen und gekrümmten Bäumen eine lastgesteuerte Festigkeitsverteilung in radialer Richtung vorherrscht (ALBRECHT, 1995). DIETRICH konnte nachweisen, daß bei gekrümmten Bäumen die Wachstumsspannungen² und Biegefestigkeiten in Umfangsrichtung auf der Baumunterseite höher sind als auf der Baumoberseite (DIETRICH, 1995; DIETRICH und MATTHECK, 1995a, 1995b). Beide stützten ihre Untersuchungen auf eine neue Meßtechnik mit deren Hilfe man direkt am grünen, lebenden Baum dessen Biegefestigkeiten bestimmen kann.

¹ Unter Smart Structures oder auch intelligenten Strukturen versteht man unter anderem Strukturen, die die Fähigkeit besitzen Informationen über ihren Belastungszustand, Schädigungen oder Lebensdauer aufzunehmen und weiterzuleiten.

² Wachstumsspannungen sind vom Baum erzeugte Eigenspannungen, die sowohl in longitudinaler, radialer und tangentialer Richtung existieren.

Diese neue Meßtechnik basiert im wesentlichen auf einem neu entwickelten, rein mechanischen Meßgerät, dem Fractometer (MATTHECK et al., 1992; MATTHECK et al., 1994c, 1995; BETHGE et al., 1994; ZIPSE et al., 1994).

Aufgrund der Weiterentwicklung des Fractometer war es in der vorliegenden Arbeit erstmals möglich auch Druck- und Schubfestigkeiten zu ermitteln und somit mehrere Festigkeitskenngrößen fast am selben Ort im Baum zu messen und einander gegenüberzustellen. Ziel der Arbeit war nun herauszufinden, ob im Baum eine lastgerechte und richtungsabhängige Verteilung der Festigkeiten vorliegt, ob Naturkonstanten aus Festigkeitsverhältnissen angebar sind und wie sich der Baum bei Störungen der Optimalgestalt bezüglich der lokalen Festigkeiten verhält.

Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel wird der Aufbau von Bäumen aus biologischer und mechanischer Sicht vorgestellt, bekannte Optimierungsmechanismen bezüglich der äußeren Baumgestalt als auch der inneren Struktur erläutert und deren teilweise erfolgte technische Umsetzung ebenfalls kurz aufgezeigt. Weiter wird die Ermittlung von Festigkeitskenngrößen an kleinen Probekörpern mit Hilfe des Fractometer dargelegt und vorhandenen Normprüfverfahren gegenübergestellt. Schließlich folgt eine Erläuterung des Versagensverhalten von Holz unter den gemessenen Belastungsgrößen und der Vorgehensweise bei der Durchführung der Messungen mit der Fractometer-Meßtechnik.

In Kapitel 3 wird der Einfluß der Probengeometrie bei der Messung von Festigkeitskenngrößen mit dem Fractometer untersucht und dessen Eignung als Meßgerät unter Beweis gestellt. Ausgehend von der Untersuchung der Festigkeitsverteilungen und Festigkeitsrelationen an geraden und fehlerfreien Laub- und Nadelbäumen folgt eine Gegenüberstellung der Festigkeitsverteilungen und Festigkeitsrelationen bei Abweichungen der Baumgestalt vom „Normalfall“. Dies sind beispielsweise schiefe und gekrümmte Bäume, um herauszufinden inwieweit Bäume richtungsabhängig und lastgesteuert ihre Festigkeiten variieren. Anschließend werden schiefe oder hohle Bäume ebenfalls auf deren Festigkeitsverteilungen und Festigkeitsrelationen hin untersucht, sowie einige Sonderfälle aufgezeigt und diskutiert. Zuletzt wird die CAIO-Methode erstmals an einem Beispiel der radialen Orientierung von Holzstrahlen angewendet und die Vermutung ihrer weitgehend schubspannungsfreien Anordnung entsprechend den Längsfasern plausibel gemacht.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit erfolgt in Kapitel 4.

2 Grundlagen

2.1 Aufbau und Mechanik von Bäumen

2.1.1 Aufbau von Bäumen

Bäume sind die größten und ältesten Lebewesen auf der Erde. Die ca. 30000 verschiedenen Arten haben sich im Zuge der Evolution als die erfolgreichsten Pflanzen im Kampf um das lebenswichtige Licht, Wasser und Nährstoffe durchgesetzt. Verantwortlich hierfür ist neben der Langlebigkeit die „Hochstämmigkeit“ der Bäume. Letztere ist auf die Bildung von Holz und damit auf die stofflich-konstruktive Vervollständigung der Festigkeitsausbildung durch den entwicklungsgeschichtlich jüngsten und charakteristischen Baustoff des Holzes, dem Lignin, zurückzuführen (KLAUDITZ, 1952).

Das *Wachstum* der Bäume kann man in das Primärwachstum in Richtung der Sproßachse und in das Sekundärwachstum senkrecht zur Sproßachse unterteilen. Verantwortlich dafür ist das Kambium, das in den Wurzeln, dem Stamm und den Ästen eines Baumes einen Zylindermantel aus mehreren Schichten embryonaler Zellen bildet, die jedes Jahr radial nach außen Bast bzw. Borke (Phloem) und nach innen Holz (Xylem) hervorbringen. Bei Laubbäumen in Klimagebieten mit winterlicher Vegetationsruhe entsteht zu Beginn der Wachstumsperiode poröseres Frühholz mit weitulmigen Gefäßen, um dem erhöhten Wasserbedarf bei der Laub- und Blütenentwicklung Rechnung zu tragen. Im Herbst wird dichteres Spätholz gebildet, d.h. die vorhandenen Zellen bilden nun mehr Zellwandteile in Bezug zum Zellumen. Das Wachstum in tangentialer Richtung erfolgt periodisch, um sich der Durchmesserergrößerung anzupassen. Die Tochterzellen des vom Kambium nach innen gebildeten Gewebes durchlaufen in den drei Wochen nach ihrer Entstehung eine Differentiation, wodurch sich unter Bildung der Sekundärwand³ verschiedene Zelltypen mit unterschiedlichen Aufgaben entwickeln. Die neu gebildeten Zellen können je nach Baumart und Funktion wenige Tage, aber auch mehrere Jahre lang leben. Es bildet sich so eine Baumgestalt, die aus übereinandergestülpten Wachstumsschichten, den Jahresringen besteht. Man unterscheidet das Splintholz, welches überwiegend aus physiologisch aktiven, lebenden Zellen besteht und vor allem der Wasserleitung und der Speicherung dient, vom Kernholz, das keine lebenden Zellen mehr enthält und vor allem Stützfunktion hat. Der Vorgang der Verkernung geht oft einher mit dem Absterben parenchymatischer⁴ Zellen, der Einlagerung spezifischer Kernstoffe, Änderungen im Gas- und Wasserhaushalt, sowie Verschuß der Hoftüpfel⁵ (GROSSER, 1977). Das Verhältnis von Splint- zu Kernholz variiert dabei stark zwischen den einzelnen Baumarten.

Verantwortlich für die *Gestalt* von Wurzeln, Stamm und Ästen sind neben den Umgebungsbedingungen, die für jeden Baum verschieden sind, erblich festgelegte Wachstumsregulatoren. Die drei wichtigsten Mechanismen (STRASBURGER et al., 1991; NULTSCH, 1974) sind:

³ Die Sekundärwand ist der Hauptbestandteil der Zellwand, deren Aufbau später noch ausführlich erläutert wird.

⁴ Parenchymzellen dienen u.a. der Stoffspeicherung.

⁵ Als Tüpfel werden Öffnungen in der Zellwand bezeichnet, über die die Lumina benachbarter Zellen miteinander in Verbindung stehen und somit ein Stoffaustausch stattfinden kann.

Der **Phototropismus** ist verantwortlich für das Wachstum des Baumes in Richtung des lebensnotwendigen Lichts, das zur Herstellung von Assimilaten mittels Photosynthese in den Blättern benötigt wird. Die wichtige Aufgabe der Assimilation räumt dem Phototropismus eine dominante Stellung vor den nachfolgend beschriebenen Regulatoren ein.

Der **Geotropismus** untergliedert sich in zwei Arten: Der **positive** Geotropismus beeinflusst die Wurzeln in Richtung der Schwerkraft zu wachsen, der **negative** Geotropismus veranlaßt den Hauptsproß entgegengesetzt der Schwerkraft zu wachsen.

Unter **Apicaldominanz** versteht man die Unterdrückung des Austriebs der Seitenknospen einer Sproßachse durch den apikalen Vegetationspunkt und die Niederhaltung von Seitenästen. Wahrscheinlich ist Auxin dafür verantwortlich, daß der Austrieb von den Seitenknospen gehemmt wird (NULTSCH, 1974) und dadurch die Gipfelknospe bevorzugt wird (STRASBURGER et al., 1991).

Im einzelnen Baum stellt sich so eine Gleichgewichtslage der verschiedenen Wachstumsregulatoren ein, die aus mechanischer Sicht nicht immer sinnvoll erscheinen muß. Wird diese Gleichgewichtslage gestört, so reagiert der Baum aufgrund dieser Reizung mit der Bildung von Reaktionsholz. Dieses neu gebildete Holz besitzt spezielle Eigenschaften zur Erfüllung der Krümmungskorrektur von Ästen und Stamm. Das Reaktionsholz unterscheidet sich grundsätzlich bei Laub- und Nadelbäumen. Bei der Bildung von Druckholz der entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelbäume erfolgt ein Längenwachstum im Holz der neu entstehenden Jahresringe, so daß sich dieses verlängert und einen Längsdruck ausübt. Bei den Laubbäumen erfolgt hingegen die Bildung von Zugholz durch aktive Verkürzung der neu gebildeten Zellen (MÜNCH, 1938). Es ist jedoch auch möglich, daß es unter gewissen Umständen zu einer ungewöhnlichen Anordnung von Zug- und Druckholz kommt, z.B. bei Mäanderformen. Das Reaktionsholz entsteht nicht als Reaktion auf mechanischem Zug oder Druck, obwohl die Namen aus der Annahme desselben entstanden, sondern es ist ein aktives Richtgewebe, das versucht aus ihrer ursprünglichen Lage gebrachte Organe wieder zurückzubringen. Es arbeitet neigungsgesteuert.

Auch beim *inneren Aufbau* gibt es wesentliche Unterschiede zwischen Laub- und Nadelbäumen. Beide Baumgattungen müssen jedoch grundsätzlich die gleichen Aufgaben eines Baumstammes erfüllen:

- **Lastabtragung**, d. h. die an der Krone angreifende Windbelastung und das Eigengewicht sind zu tragen.
- **Leitung**, d. h. das von den Wurzeln aufgenommene Wasser und Nährsalze müssen nach oben, und die von den Blättern produzierten Assimilate nach unten transportiert werden.
- **Speicherung**, d. h. Nahrungsstoffe (Kohlenhydrate) müssen für Zeiten erhöhten Energiebedarfs (Blattaustrieb) gespeichert werden.

Die Holzstruktur von Bäumen kann man neben der zuvor beschriebenen makroskopischen in drei weitere Organisationsebenen unterteilen und zwar mikroskopisch, fibrillär und molekular.

Bei Nadelbäumen nehmen auf mikroskopischer Ebene zwei verschiedene Zelltypen die Aufgaben eines Stammes wahr. In Abbildung 2.1 ist der Aufbau eines Nadelbaumes im Tangential-, Radial- und Querschnitt am Beispiel einer Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) dargestellt.

Rotfichte
(*Picea abies* (L.) Karst.)

Querschnitt (150x)

Radialschnitt (150x)

Tangentialschnitt (150x)

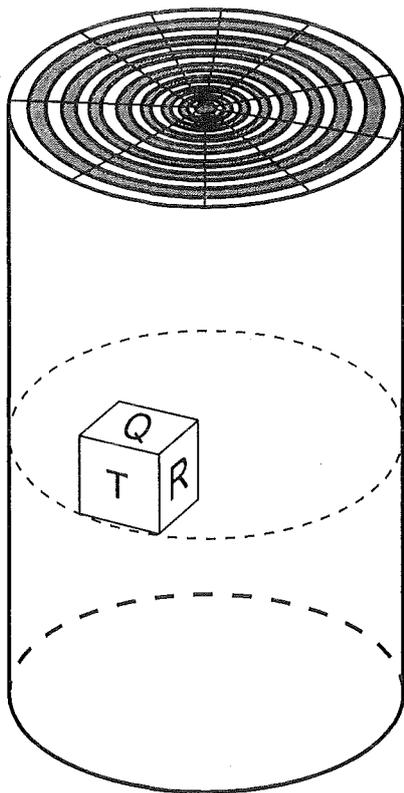
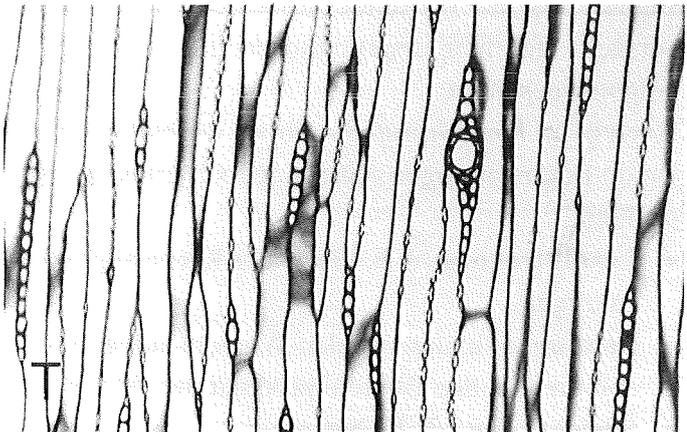
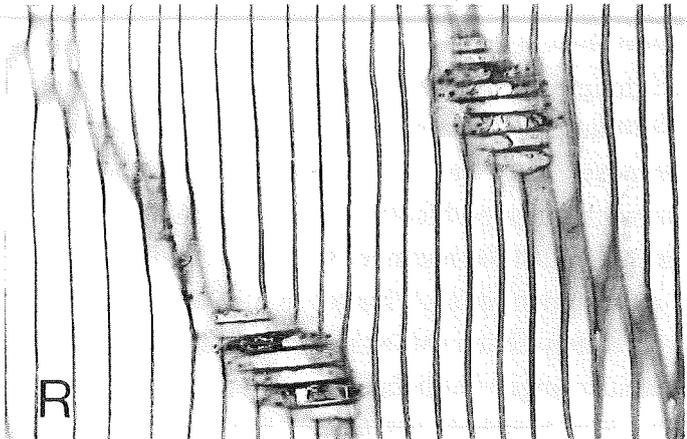
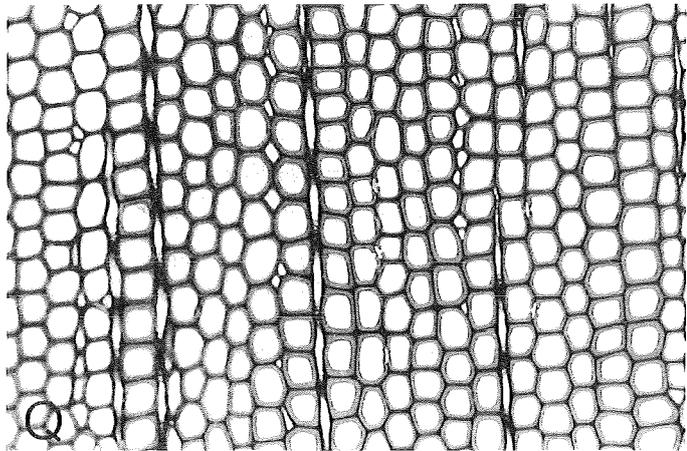


Abbildung 2.1: Aufbau eines Nadelbaumes anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen des Tangential-, Radial- und Querschnitts am Beispiel einer Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) bei 150facher Vergrößerung (Lichtmikroskopische Aufnahmen: F. Schwarze).

Der überwiegende Anteil des Holzkörpers besteht aus vertikal angeordneten Tracheiden (ca. 90%), die für Festigung und Leitung verantwortlich sind. Tracheiden sind tote, langgestreckte Zellen mit dicken, verholzten Zellwänden und mit Hoftüpfeln besetzt. In Klimagebieten mit Winterruhe sind die im Frühjahr gebildeten Tracheiden weitlumiger mit geringerer Wandstärke, um verstärkt die Wasserleitung zu unterstützen, im Spätjahr englumiger mit größerer Wandstärke, um die Funktion der Festigung wahrzunehmen.

Im Querschnitt eines Baumstammes erkennt man so deutlich den jährlichen Zuwachs in Form von Jahresringen. Die Speicherung von Nahrungsstoffen wird von Parenchymzellen übernommen, die hauptsächlich in den radial angeordneten Holzstrahlen lokalisiert sind und nahezu die restliche Holzmasse ausmachen (ca. 4-12%).

Bei den entwicklungsgeschichtlich jüngeren Laubhölzern hingegen erfolgte eine Spezialisierung in der Weise, daß jede Funktion von einer speziellen Zellart übernommen wird. Man unterscheidet mikroskopisch vier Zelltypen, wobei die Tracheiden, wie bei den Nadelhölzern für Leitung und Festigung zuständig, nur in Spuren und bei manchen Laubhölzern gar nicht vorhanden sind. Die Speicherung von Nahrungsstoffen wird auch hier von Parenchymzellen übernommen, die entweder radial als Holzstrahlen oder axial angeordnet sind und deren Anteil an der Holzmasse im Mittel 30% beträgt. Die Festigung übernehmen axial gerichtete, englumige Librifasern mit einem durchschnittlichen Anteil von 55% der Holzmasse. Die Leitungsfunktion wird schließlich von ebenfalls axial gerichteten, jedoch weitlumigen Gefäßen ausgeführt, deren Länge sich je nach Baumart von wenigen Millimetern bis über den gesamten Holzkörper erstrecken kann. Die Gefäße bilden durch Kontakt ein geschlossenes Röhrensystem und ermöglichen die Wasserleitung in axialer Richtung. Der Gefäßanteil liegt zwischen 2 und 65%, im Mittel bei 15%, der Durchmesser und die Anordnung der Gefäße variieren ebenso stark, je nach Baumart. Bei zerstreutporigen Laubbäumen erfolgt der Übergang vom Frühholz (weitlumig) zum Spätholz (englumig) stetig und die Größenunterschiede der Lumen sind relativ gering. Im Gegensatz dazu erfolgt der Übergang bei ringporigen Laubbäumen abrupt und die Durchmesser von Früh- zu Spätholz können sich bis zu 10:1 verhalten (KOLLMANN, 1982; DINWOODIE, 1981; BRAUN, 1988). In Abbildung 2.2 ist der Aufbau eines zerstreutporigen Laubbaumes im Tangential-, Radial- und Querschnitt am Beispiel einer Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) dargestellt.

Der Aufbau einer Zellwand setzt sich aus mehreren Schichten zusammen, deren Bildung sich zeitlich getrennt vollzieht. Zunächst wird nach der Teilung einer Kambiumzelle zwischen den Tochterzellen die Mittellamelle als dünne Trennschicht gebildet, die sich aus Hemizellulosen⁶, Ligninen und Pektinen zusammensetzt. Daran entsteht die erste eigene Wand der Zelle, die Primärwand. Ihre Zusammensetzung entspricht weitgehend der der Mittellamelle, jedoch ist der Ligninanteil höher und 10% der Schicht besteht aus regellos verstreuten Mikrofibrillen⁷. Die sich der Primärwand nach innen anschließende Sekundärwand wird wiederum in drei Schichten unterteilt (S1-, S2- und S3-Schicht) und stellt die mit Abstand dickste Schicht der Zellwand dar (bis zu 95%), in der die Mikrofibrillen dicht gepackt und parallel ausgerichtet sind.

⁶ Die molekularen Bestandteile der Zellwand (Lignin, Hemizellulose, Pektine, Zellulose) werden später noch im einzelnen besprochen.

⁷ Mikrofibrillen bestehen aus über Wasserstoffbindungen zusammengesetzten Elementarfibrillen, die wiederum aus großen Zellulosemolekülen aufgebaut sind.

Rotbuche
(*Fagus sylvatica* L.)

Querschnitt (150x)

Radialschnitt (150x)

Tangentialschnitt (150x)

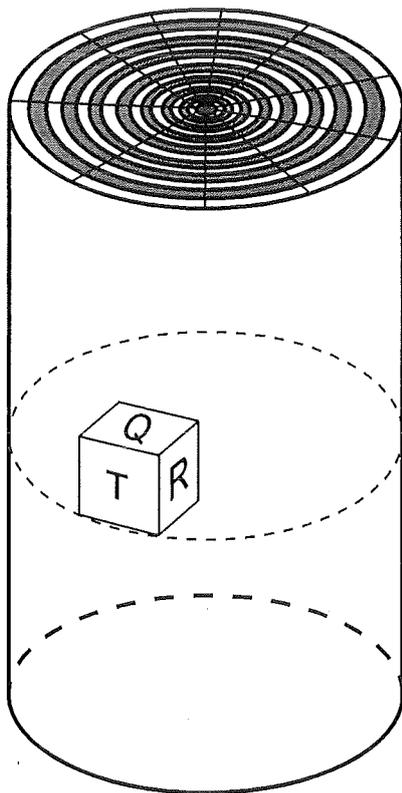
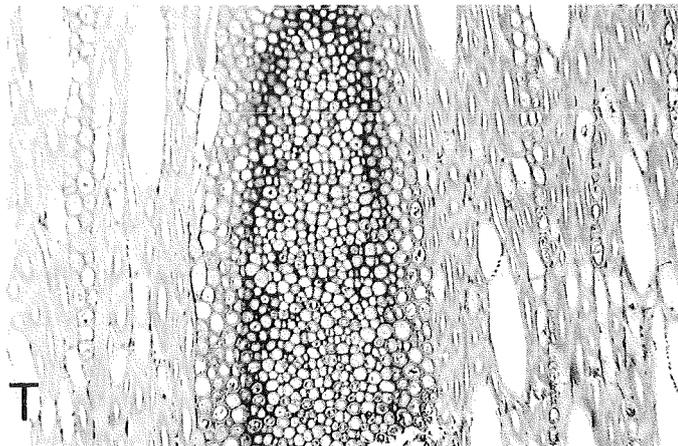
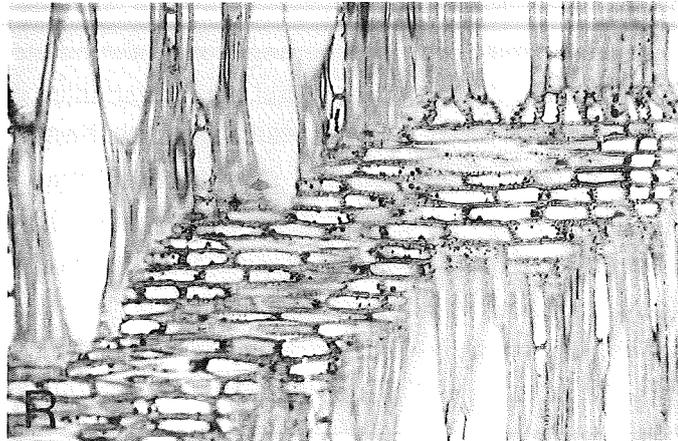
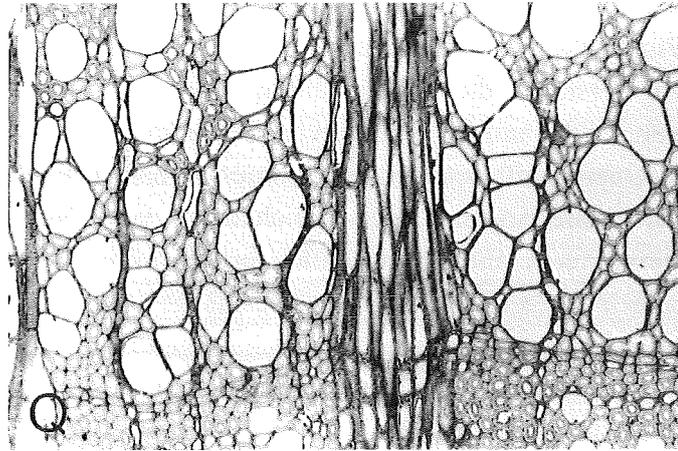


Abbildung 2.2: Aufbau eines zerstreutporigen Laubbaumes anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen des Tangential-, Radial- und Querschnitts am Beispiel einer Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) bei 150facher Vergrößerung (Lichtmikroskopische Aufnahmen: F. Schwarze).

Die an die Primärwand angrenzende Schicht (S1) ist dünn (9% der gesamten Zellwand), die Mikrofibrillen wechseln sich zwischen einer Links- und Rechtsspirale ab und der Neigungswinkel zur Längsachse beträgt 50-70°. Die S2-Schicht der Sekundärwand stellt mit 85% den Hauptanteil der Zellwand, die Mikrofibrillen beschreiben eine Rechtsspirale mit einem Neigungswinkel von 10-30° zur Längsachse.

Zuletzt folgt die S3-Schicht, die bei manchen Hölzern unter bestimmten Voraussetzungen fehlen kann (z.B. bei Fichte und Birke (MEIER, 1955)) und ähnlich der S1-Schicht abwechselnd aus Links- und Rechtsspiralen (Neigungswinkel 60°) aufgebaut, jedoch dünner ist (1% der gesamten Zellwand) sowie einen höheren Ligninanteil aufweist (DINWOODIE, 1981; BRAUN, 1988).

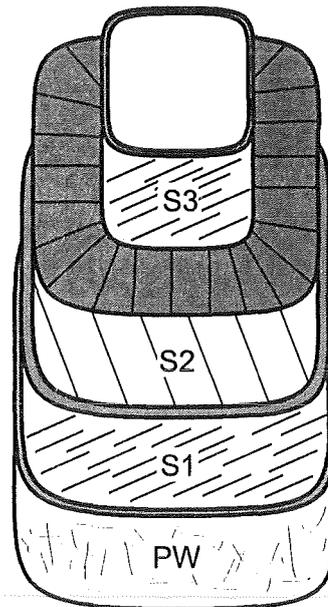
In Abbildung 2.3 sind die Funktionen und die Wanddicken der verschiedenen Holzzellentypen bei Laub- und Nadelbäumen, sowie das Zellwandmodell von SELL und ZIMMERMANN (1993) von Nadelholztracheiden dargestellt.

Die molekulare Struktur von Holz läßt sich unterteilen in Lignin, Zellulose, Hemizellulose, Pektine und einem geringen Anteil anderer Substanzen (Asche, Harze, Fette, etc.).

Zellulose ist mit bis zu 50% Gewichtsanteil der Hauptbestandteil der Zellwand und zeichnet sich durch eine hohe Zugfestigkeit⁸ aus. Das Polysaccharid mit der allgemeinen Formel $(C_6H_{10}O_5)_n$ ist aus einem einfachen Zucker, der Glucose, aufgebaut, wobei sich je ca. 2000 zu einem Zellulosemolekül zusammenlagern. Die *Hemizellulosen* haben einen Gewichtsanteil von bis zu 25% der Zellwand und sind vornehmlich in der Sekundärwand als abstützender und versteifender Baustoff in dem zellulosischen Grundgefüge eingelagert (KLAUDITZ, 1952). Unter Hemizellulosen versteht man Kohlenhydrate, die von Zuckern wie Pentosen und Hexosen abstammen, aber keine Glucose enthalten; sie bilden zusammen mit den Ligninen die Matrix, die zwischen der Gerüstsubstanz (Zellulosemikrofibrillen) inkrustiert ist. Die *Lignine* (lat.: lignum = Holz, Holzstoff) sind mit bis zu 30% am Zellwandaufbau beteiligt und stellen den entwicklungsgeschichtlich jüngsten Baustoff des Holzes dar. Lignin ist eine hochmolekulare und amorphe Struktur, die vor allem aus Untereinheiten besteht, deren Kohlenstoffskelett aus einem aromatischen Ring und einer linearen Kette von drei Kohlenstoffatomen aufgebaut ist (BRAUNS, 1952). Dadurch kann das Lignin in die interfibrillären Räume wachsen und die Zellwand starr und druckfest machen (BRAUN, 1988). Das Lignin wirkt in doppelter Hinsicht auf die Erhöhung der Druckfestigkeit des grünen Baumes und ermöglicht erst die Entstehung hochstämmiger Landpflanzen. Zunächst wird die Druckfestigkeit durch Abstützen der Zellwandschichten und des Zellverbundes erhöht (gleichgerichtet den Hemizellulosen). Die Primärwirkung des Lignins besteht jedoch in der Hydrophobierung und Dehydratation der Kohlenhydratbaustoffe (Zellulose, Hemizellulose, Pektine). Dabei werden die übermolekularen Haft- und Bindungskräfte der molekularen Kohlenhydratbaustoffe deutlich erhöht und ein beträchtlicher Festigkeitsanstieg bewirkt. Lignin kann somit als ein die „Naßfestigkeit“ bewirkender Baustoff der Zellwand aufgefaßt werden. Vor allem in den Zonen, in denen die stark hydratisierbaren, hydrophilen Pektinstoffe wirken (Mittellamelle, Primärwand) ist die Konzentration des Lignins am höchsten, um die maßgebenden Verbindungsstellen in ihrer Naßfestigkeit der Gesamtwirkung einzupassen (KLAUDITZ, 1952). Mengenmäßig beinhaltet jedoch die Sekundärwand am meisten Lignin.

⁸ Zellulose hat im festen Zustand eine Dichte von $1,5\text{g/cm}^3$ und besitzt bezogen auf ihr Gewicht einen ähnlich hohen Elastizitätsmodul wie Metalle, ihre Zugfestigkeit ist sogar höher (GORDON, 1989).

Zellwand-schicht	Fibrillen-winkel	Zellwand-anteil
S3	60°	1%
S2	30°	85%
S1	70°	9%
PW	regellos	} 5%
ML	-	



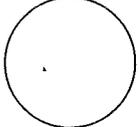
Zelltyp	Wandstärke	Funktion	Anteil bei	
			Laubbäumen	Nadelbäumen
Parenchymzellen		Speicherung	30%	10%
Tracheide		Leitung/Festigung	<1%	90%
Faser		Festigung	55%	-
Gefäß		Leitung	15%	-

Abbildung 2.3: Funktion und Wanddicken verschiedener Holzzellentypen bei Laub- und Nadelbäumen, sowie das Zellwandmodell von Nadelholztracheiden nach SELL und ZIMMERMANN (1993).

Die *Pektine* bzw. Pekto-Polyuronide (griech.: pektós = fest, geronnen) bestehen aus Molekülen der Galakturonsäure (Kohlenhydrat), die sich zu langen Ketten der Pektinsäure verknüpfen und ihrerseits mit den mehrwertigen Metallionen Kalzium und Magnesium zu wasserunlöslichen Riesenmolekülen vernetzen (BRAUN, 1988). Die Pektine bilden den Hauptbestandteil der Mittellamelle.

Aufgrund ihrer chemischen Konstitution, physikalischen Eigenschaften und ihrer zweckgebundenen Lokalisation in der Zellwand geht man davon aus, daß sie die Verbindungsbaustoffe der Holzzellwände und des Holzes darstellen. Sie verkleben und verbinden die Einzelfasern in der Mittellamelle und sorgen für die lastübertragende Verbindung

von der Mittellamelle über die Primärwand zur Außenschicht (S1) der Sekundärwand (KLAUDITZ, 1952). Der Anteil an der Zellwand liegt bei Laubhölzern etwas höher (6-8%) als bei den Nadelhölzern (4-6%), und wachsende Pflanzenteile (Kambium) enthalten mehr Pektine. Das Fleisch der meisten Früchte besteht fast zur Hälfte aus Pektinen, die in der Lebensmittel-, Kosmetik- und Klebstoffindustrie als Emulgator zur Anwendung kommen.

2.1.2 Mechanik von Bäumen

Ein Baum stellt mechanisch betrachtet einen fest eingespannten (Wurzeln) Biegeträger (Stamm) dar, der an einem Ende mit einer senkrecht zu seiner Längsachse angreifenden Einzelkraft (Windbelastung mit Krone als Angriffsfläche) belastet wird. Hinzu kommt eine weitere äußere Belastung durch sein Eigengewicht, sowie durch vom Baum selbst erzeugte Eigenspannungen (Wachstumsspannungen). MATTHECK (1992a) interpretierte einen Baum als eine Kette lastgerechter Glieder und verglich ihn mit einem Segelboot in einer sehr zähen Flüssigkeit. Die über die Krone (Segel) eingeleitete Windbelastung wird durch den Stamm (Mast) in die Wurzeln (Rumpf) weitergeleitet (Abbildung 2.4). Jedes Glied der Kette ist hierbei entsprechend der zu tragenden Last dimensioniert; Bäume besitzen im zeitlichen Mittel überall auf der Oberfläche des Baumskeletts eine konstante Spannungsverteilung, es gibt also weder über- noch unterbelastete Bereiche.

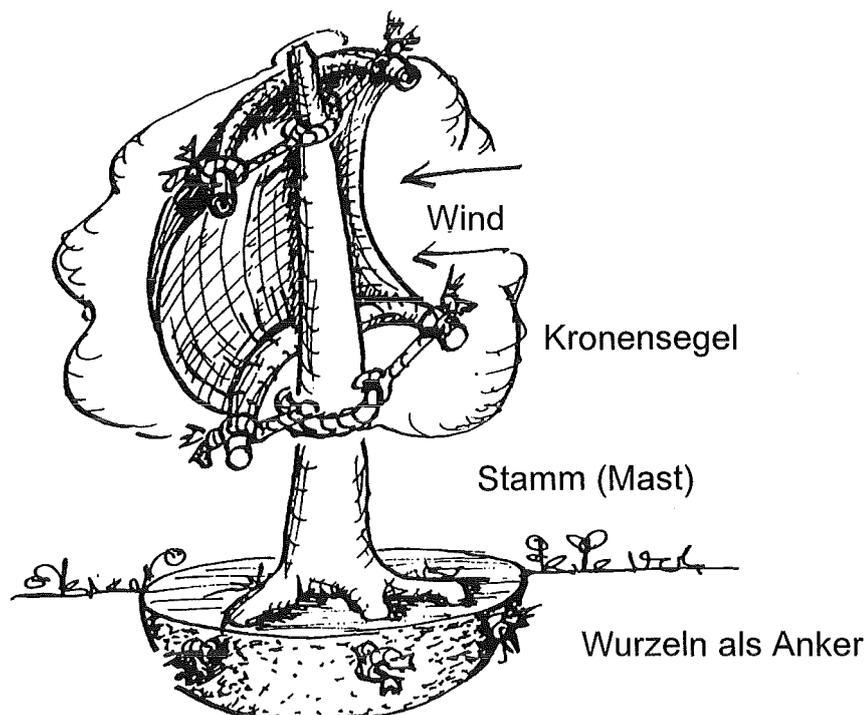


Abbildung 2.4: Der Baum als Kette lastgerechter Glieder (Zeichnung C. Mattheck).

Dies bedeutet gleichsam, daß ein Baum durch die sinnvolle Verteilung seines „Baumaterials“ im Idealfall überall gleichzeitig versagen würde und damit das Kriterium für ein Leichtbaudesign (weder über- noch unterbelastete Bereiche zu besitzen) optimal erfüllt. Beispiele für das von MATTHECK (1992a) formulierte Axiom konstanter Spannung sind die Verjüngung des Stammes von unten nach oben (METZGER, 1893), kerbspannungsfreie Ast- und Wurzelanbindungen oder auch ausgebildete Rippen und Beulen (Defektsymptome) beim Auftreten von inneren Rissen oder Faulhöhlen (Defekte).

Die Materialeigenschaften von Bäumen werden insbesondere durch die überwiegende Orientierung der Holzzellen parallel zur Stammachse beeinflusst, die so eine Struktur mit anisotropen Eigenschaften erzeugen. Dadurch ist das Holz der Bäume in Längsrichtung (d.h. Faserrichtung) deutlich steifer und fester als quer zur Faserrichtung. Bei Buche beträgt die Zugfestigkeit längs zur Faser ungefähr das 10fache der Biegefestigkeit in tangentialer Richtung. In erster Näherung läßt sich Holz mechanisch als zusammengeklebte, zugfeste Seilbündel (Holzfaser) mit radial eingeflochtenen Zuggurtungsseilen (Holzstrahlen) beschreiben. MATTHECK formulierte ein stark vereinfachtes mechanisches Ersatzmodell, indem er die S2-Schicht der Zellen mit zähem, zugfestem Stahl, sowie die Mittellamelle und Primärwand mit sprödem, druckfestem Beton verglich (MATTHECK und BRELOER, 1994). Abbildung 2.5 zeigt schematisch die realen Gegebenheiten ringporigen Holzes (A) sowie das vereinfachte, mechanische Ersatzmodell (B).

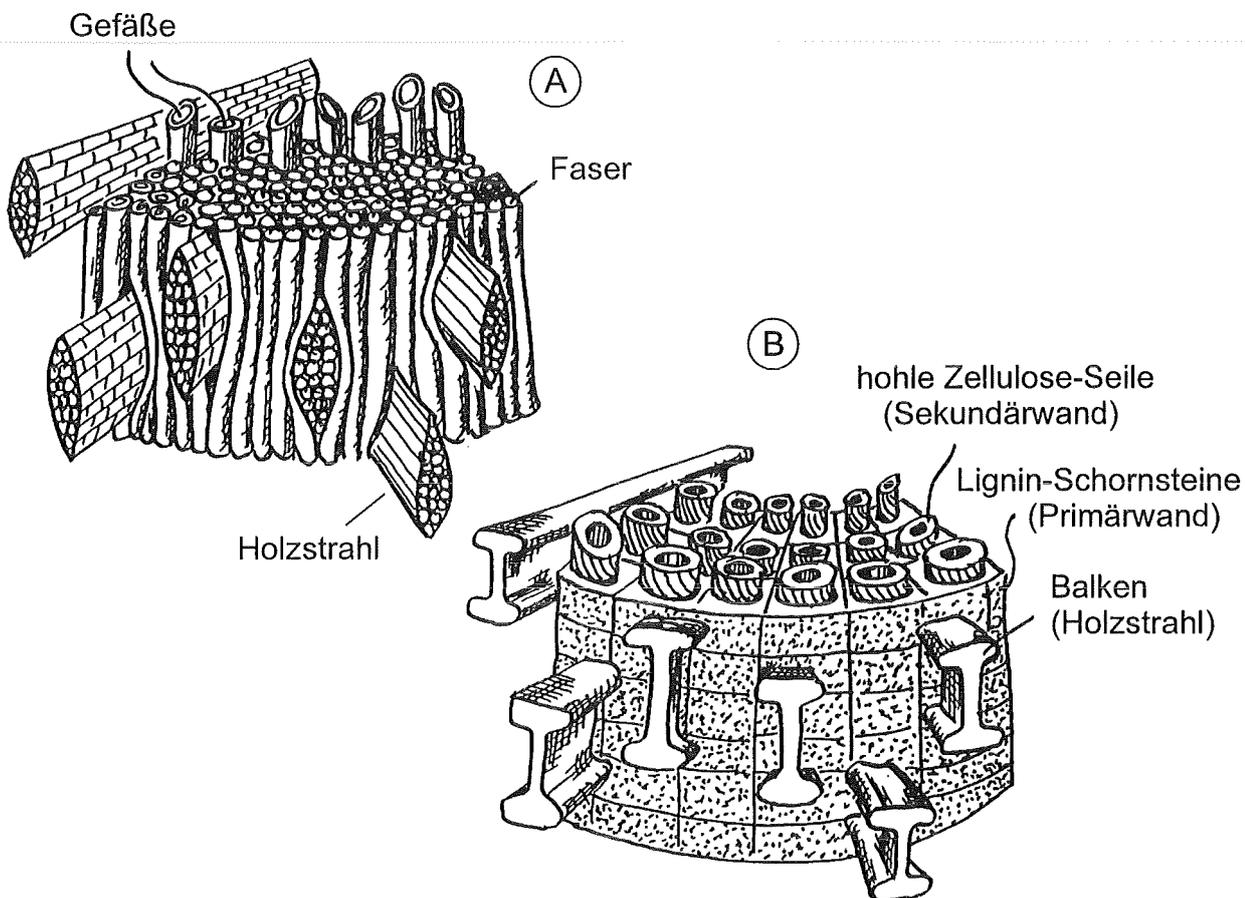


Abbildung 2.5: Reale Gegebenheiten (A) und mechanisches Ersatzmodell (B) anhand eines Jahresringausschnittes ringporigen Holzes (Zeichnung: C. Mattheck).

Die auf Biegung und Schub belasteten Holzstrahlen erfüllen mechanisch die Funktion der Querverriegelung. Die Versteifungen bei überwiegender Biegebelastung an den äußeren Enden der spindelförmigen Holzstrahlen, die an Esche in Form eines höheren Ligninanteils

nachgewiesen wurde, erhöhen dadurch deren Biegesteifigkeit⁹ (MATTHECK und SCHWARZE, 1994). Beim mechanischen Ersatzmodell sind diese als I-Träger mit homogener Materialverteilung dargestellt. Eine Biegebelastung liegt vor allem bei mäßig hohen Holzstrahlen vor, höhere Holzstrahlen werden eher auf Schub belastet (z.B. Holzstrahlen bei Eiche). Die Spindelform von Holzstrahlen im tangentialen Längsschnitt ist hierbei erforderlich, um die Längsfasern durch eine weiche Umlenkung des Kraftflusses (Minimierung der Spaltkräfte durch stumpfe Umlenkwinkel) und ohne Schubbelastung zwischen den Fasern, optimal um die Holzstrahlen umzulenken (MATTHECK et al., 1994a; KRIECHBAUM, 1994). Computersimulationen stellten die spindelförmige Ausrichtung der Fasern bei einer Kraftflußumlenkung um ein vorgegebenes Kreisloch als optimale Geometrie zur Vermeidung von Schubversagen zwischen den Fasern unter Beweis. Die Simulationen wurden mit Hilfe der CAIO-Methode (Computer Aided Internal Optimization) durchgeführt, einem im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Berechnungsverfahren, das die Fasern eines Faserverbundes unter Berücksichtigung vorgegebener Bedingungen entlang den Hauptnormalspannungstrajektorien ausrichtet (durch iterative Umorientierung der Materialeigenschaften). Experimente zeigten eine deutlich höhere Bruchlast (1,5fach) bei einem nach der CAIO-Methode optimierten Faserverbund in Form einer spindelförmigen Öffnung im Vergleich zu einer Probe mit uniaxialer Faseranordnung und einem kreisförmigen Loch in der Mitte (MATTHECK et al., 1994a). Die Spindelform wiederholt sich mehrfach in Bäumen und zwar sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch an solchen Bereichen, in denen eine Kraftflußumlenkung um ein Hindernis erforderlich ist (Hoftüpfel, Wundspindel, Holzstrahl). In Abbildung 2.6 sind einige solcher Beispiele skizziert. Die Spitze der Spindel zeigt hierbei immer in Richtung des Kraftflusses (MATTHECK und KUBLER, 1995). Holzstrahlen verhindern durch ihre senkrechte Anordnung zu den Jahresringen die Einleitung von Spaltkräften, und die im Baum wirkenden Wachstumsspannungen stehen mit der Geometrie und Anordnung der Holzstrahlen ebenfalls im Einklang.

In der Natur trifft man meist Zugstrukturen an, weil diese im Vergleich zu Druckstrukturen offensichtlich die leichteren und effizienteren Lösungen darstellen und einen höheren Wirkungsgrad besitzen (GORDON, 1989). Auch bei Bäumen läßt der Aufbau des Hauptbestandteils (ca. 85%) der einzelnen Holzzelle, der S2-Schicht der Sekundärwand, schon eine höhere Zugfestigkeit als Druckfestigkeit in Faserrichtung vermuten, was sich in der Praxis auch bestätigt (2-4fach höher). Dies spiegelt jedoch nicht die tatsächlichen Verhältnisse im lebenden Baum wieder, denn es muß zunächst unterschieden werden zwischen der „biologischen Festigkeit“ und der „technischen Festigkeit“ von Holz sowie der „Festigkeit eines Baumes“ unter Berücksichtigung der Wachstumsspannungen. Unter der „biologischen Festigkeit“ wird im folgenden die Festigkeit des wasserdurchfeuchteten Holzes oberhalb des Fasersättigungsbereich, wie sie im lebenden Baum vorliegt, unter der „technischen Festigkeit“ die Festigkeit des lufttrockenen Holzes, wie es für technische Zwecke verwendet wird, definiert (KLAUDITZ, 1952).

⁹ MATTHECK und SCHWARZE (1994) fanden an den oberen und unteren Enden der Holzstrahlen von Esche (*Fraxinus excelsior* L.) in der tangentialen Betrachtungsebene durchgehende Mittellamellen, hingegen im Restquerschnitt auffallende Interzellularen (Zellzwischenräume).

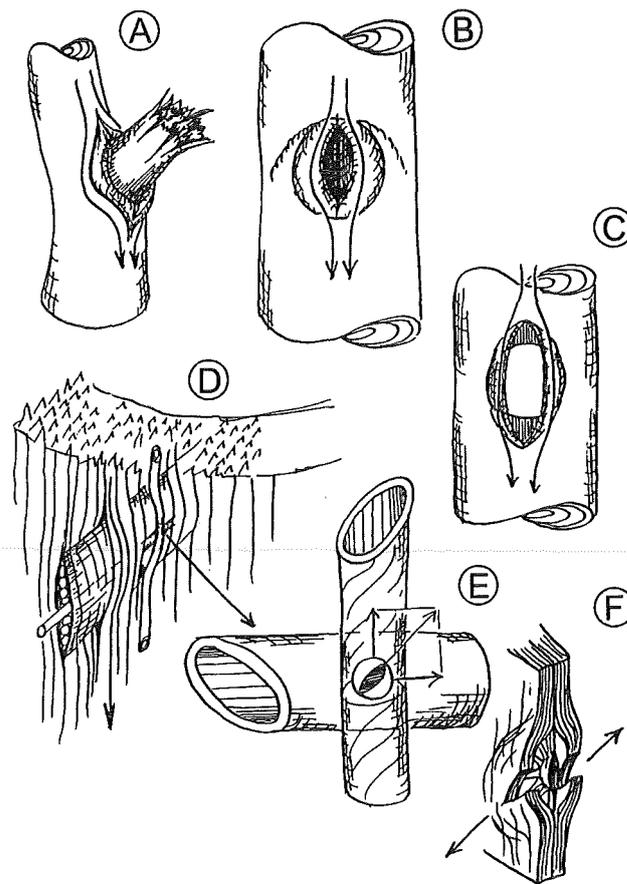


Abbildung 2.6: Die Spindelform als optimale Geometrie zur Kraftflußumlenkung bei Astkragen (A), Wundöffnungen (B,C), Holzstrahlen (D) und Tüpfeln (E,F) (Zeichnung: C. Mattheck).

Bei der „Festigkeit eines Baumes“ muß man die vorliegenden Wachstumsspannungen berücksichtigen. Wie später noch erläutert wird, versagen lasttragende Holzzellen vorrangig unter Druckbelastung durch lokales Knicken in der Zellwand (S2-Schicht) und nicht durch Eulersches Knicken über die gesamte Länge hinweg (DINWOODIE, 1981; FREY-WYSSLING, 1938; KISSER und FRENZEL, 1950). Das Eulersche Knicken über die gesamte Länge einer Holzzelle wird vor allem durch den schraubenförmigen Bau der Sekundärwand aufgrund der Umwandlung von Längsdruckkräften in Querkzugkräfte verhindert, dabei werden die zugfesten Mikrofibrillen der flacheren S1-Schicht auf Zug belastet (MÜNCH, 1938). Weiter fanden SELL und ZIMMERMANN (1993) bei Fichten- und Tannenzellen auf Querbruchflächen der S2-Schicht eine radiale oder annähernd radiale Vorzugsorientierung von Fibrillenagglomerationen bezogen auf die Längsachse der Zelle. Dies läßt auf eine größere Festigkeit des Fibrillenverbundes der S2-Schicht in radialer als in tangentialer Richtung schließen, was bei Druckbeanspruchung in Faserrichtung für die Beulsicherheit der Zellwand und des gesamten Zellgewebes vorteilhaft wäre (SELL und ZIMMERMANN, 1993).

Um zu höheren Druckfestigkeiten zu gelangen, bieten sich bei Bäumen mit vorgegebenem Durchmesser der Holzzellen demnach nur folgende Möglichkeiten:

- Erhöhung der Wandstärke der Holzzelle: metabolisch zu teuer bei Kosten/Nutzen-Rechnung für den Baum.
- Steifigkeitserhöhung durch Verringerung des Winkels zwischen den Mikrofibrillen der S2-Schicht und der Längsachse: Erhöhung der Gefahr des unkontrollierten Knickens auf mikrofibrillärer Ebene.

Vorspannung der Struktur: Die bei Windbelastung (Hauptbelastung) auf der Zugseite der Biegung auftretenden Zugspannungen liegen deutlich unter der Zugfestigkeit in Faserrichtung, somit ist es Bäumen möglich parallel zur Stammachse Eigenspannungen zu erzeugen. Diese sind im äußeren Drittel des Radius Zugspannungen und nach innen hin Druckspannungen. Hierdurch erhöht der lebende Baum seine „Druckfestigkeit“ im äußeren Bereich des Querschnitts, wo auch die höchsten Biegespannungen wirken, um den Betrag der Wachstumsspannungen (Zugspannungen).

Die weiter im Bauminneren induzierten Wachstumsspannungen (Druckspannungen) spielen nur eine untergeordnete Rolle, da sie in der Nähe der neutralen Faser der Biegung liegen. Auch in radialer und tangentialer Richtung besitzen Bäume Wachstumsspannungen, in radialer Richtung sind dies von innen nach außen abklingende Zugspannungen und in tangentialer Richtung außen Druckspannungen und innen Zugspannungen (ARCHER, 1987; KUBLER, 1959a, 1959b).

Abbildung 2.7 zeigt die jeweiligen Wirkungsrichtungen der Wachstumsspannungen beispielhaft in Holzstrahlumgebung im äußeren Stammbereich eines Baumes.

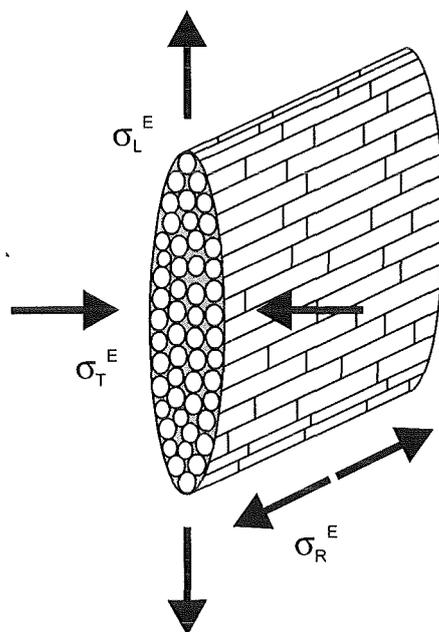


Abbildung 2.7: Wirkungsrichtungen der Wachstumsspannungen beispielhaft in Holzstrahlumgebung im äußeren Stammbereich eines Baumes.

Die hohe Zugfestigkeit von Holz parallel zur Stammachse hat folgende Gründe:

- Grundsubstanz (bis zu 94%) der für die mechanischen Eigenschaften verantwortlichen, dicken S2-Schicht ist die äußerst zugfeste Zellulose, deren spezifische Zugfestigkeit fünf mal so hoch ist wie die von Stahl.
- Nutzung der größeren Sicherheit kleiner Strukturen durch seilförmige Anordnung der Zellulosemoleküle zu Elementarfibrillen und weiter zu Mikrofibrillen.
- Umwandlung von Längszugkräften in Querdruckkräfte durch schraubenförmigen Bau der Zellwandschichten der Sekundärwand. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der seitlichen Anziehungskräfte und zu einer Erschwerung des Vorbeigleitens benachbarter Mikrofibrillen.
- Infolge einer festen Verklebung benachbarter Primärwände durch die Mittellamelle, besteht eine hohe Verbindungsfestigkeit zwischen Mittellamelle und Primärwand.
- Cook-Gordon-Effekt: Ablenkung und Stoppen von Rissen durch Bildung von Sekundärrissen infolge leichter Spaltbarkeit von Holz parallel zur Faserrichtung (geringe Querkzugfestigkeit vor allem in tangentialer Richtung).

Bei Abweichungen von der „Normalgestalt“ müssen Bäume vor allem in mechanischer Hinsicht reagieren, um ihre Optimalgestalt wiederherzustellen. Abweichungen von der „Normalgestalt“ können z.B. durch Wundverletzungen, Faulhöhlen infolge Pilzbefall oder Feuer, Schiefstellungen oder durch andere sich ändernde Umweltbedingungen entstehen. Die Reaktionen von Bäumen erfolgen dabei meist auf mehreren Ebenen. Bei auftretenden Defekten wird die äußere Gestalt durch Bildung von Defektsymptomen wie Rippen, Wülsten und Wundholz nach dem Axiom konstanter Spannung wieder möglichst kerbspannungsfrei geformt. Bei schiefstehenden Bäumen oder aufgrund einer Störung der Gleichgewichtslage entsteht Reaktionsholz und die Baumgestalt erfährt eine Krümmung. Damit es zur Krümmung einzelner Baumteile kommt, sind Veränderungen der Holzstruktur auf makroskopischer, zellulärer, fibrillärer und molekularer Ebene erforderlich, die zwangsläufig Veränderungen der mechanischen Eigenschaften bedeuten bzw. verlangen. Zum Beispiel bilden Nadelbäume als Reaktionsholz auf der Unterseite schiefgestellter Bäume Druckholz aus, welches als aktives dynamisches Element zur Richtungsbewegung dient. Dabei ist im Vergleich zum Normalholz eine Unterscheidung zwischen Früh- und Spätholz kaum möglich, da auch die Frühholztracheiden dickwandig sind. Weiter sind die Druckholztracheiden dickwandiger und kürzer als Normalholztracheiden mit radialen Spalten in der S2-Schicht sowie im Querschnitt rundlich. Die Steigungswinkel zur Vertikalen sind bei den Druckholztracheiden flacher (S2-Schicht: 40°, S1-Schicht: 80°) als bei den Normalholztracheiden (S2-Schicht: 30°, S1-Schicht: 72°), wodurch die Umwandlung von Längs- in Querkräfte und umgekehrt begünstigt wird. Die Druckfestigkeit in Faserrichtung ist höher, aber die auf die Rohwichte bezogenen Festigkeitseigenschaften sind niedriger, und der Ligningehalt ist um 20-35% höher als bei Normalholz (KOLLMANN, 1982; WAGENFÜHR und SCHEIBER, 1989). Bäume reagieren durch solche Struktur- und Zellanpassungen gezielt auf veränderte Gegebenheiten und Störungen ihrer mechanischen Optimalgestalt und Optimalstruktur, um diese schnellstmöglich wiederherzustellen.

Diese Anpassungen lassen sich allgemein gliedern in:

- Reduzierung der äußeren Belastungen (Hebelarmreduzierung infolge Reaktionsholzbildung, Flexibilitätsstrategie)
- Optimierung der äußeren Gestalt (Axiom konstanter Spannung)

- Optimale Orientierung der Fasern (Reduktion der Schubspannungen zwischen den Fasern)
- Optimale Verteilung der Wachstumsspannungen (indirekte Festigkeitserhöhung)
- Optimale Verteilung der Grundsubstanzen (Festigkeitserhöhung)
- Zellaufbau (Festigkeitserhöhung)

Neuere Ergebnisse auf diesem Gebiet zeigen z.B., daß bei Wurzelanläufen und gekrümmten Bäumen eine lastgesteuerte Festigkeitsverteilung in radialer Richtung vorherrscht (ALBRECHT, 1995) und bei gekrümmten Bäumen die Wachstumsspannungen und Biegefestigkeiten in Umfangsrichtung auf der Baumunterseite höher sind als auf der Baumoberseite (DIETRICH, 1995).

2.2 Meßgrößen und Methoden

2.2.1 Versagen und Festigkeitsermittlung von Holz in Faserrichtung

Das Versagen von Holz unter *Druckbelastung* ist in der Vergangenheit bereits eingehend untersucht worden. Insbesondere zum Versagen in Faserrichtung existiert zahlreiche Literatur, aufbauend auf der grundlegenden Arbeit von ROBINSON (ROBINSON, 1921), der im Initialstadium bleibender Verformungen bei Druckbeanspruchung in Faserrichtung feine, scharf begrenzende und sich kreuzende Linien fand. ROBINSON deutete diese Linien als Gleitflächen („slip planes“). Dabei kommt es zu s-förmigen Verbiegungen der Micellarstruktur, nicht aber zum Bruch der Fibrillen (WARDROP und DADSWELL, 1947; RUNKEL, 1951; FREY-WYSSLING, 1953). Aus den Initialstadien entstehen mit steigender Druckbelastung stärkere Deformationen, wodurch die „slip planes“ zunächst eine mikroskopisch erkennbare Linie bilden und nach weiterer Belastungsdauer oder Drucksteigerung hieraus makroskopisch sichtbare Stauchlinien entstehen (KISSER und STEININGER, 1952; DINWOODIE, 1981). Während bei harten, dichten und homogenen Materialien ein Bruch unter Druckbelastung aufgrund von Scherungsrissen entsteht, die unter einem Winkel von 45° auftreten, verlaufen die Knickzonen bei Druckbelastung in Faserrichtung von Holz senkrecht zur Druckrichtung. Diese meist stabilen Kompressionsknicke entstehen bei einem biegebelasteten Baumstamm an der Oberfläche (Ort höchster Druckbelastung) und führen zu einer Stauchung und weniger zum Materialbruch. Nicht selten findet man Bäume mit lokalen Faserknickzonen, die aber dennoch relativ versagenssicher sind, da vor einer Ausbreitung der Knicke aufgrund der hierzu erforderlichen Energie eher neue Knickbänder entstehen, und somit ein plötzliches Versagen unwahrscheinlich ist (GORDON, 1989).

DELORME und VERHOFF (1975) untersuchten an durch Wind überbelasteten Fichten die Erscheinungsformen von Zellwanddeformationen im Bereich von Faserstauchungen mittels der Rasterelektronenmikroskopie. Ihre Ergebnisse sind im folgenden kurz zusammengefaßt:

- Die Trennung der Zellwände erfolgte nicht an der Mittellamelle, sondern im Bereich der S2-Schicht oder der Grenze der S1-Schicht zur S2-Schicht. Es fand also ein lokales Versagen in der Zellwand und kein Knicken über die gesamte Länge der Faser statt.
- An Orten, wo sich die Zellen voneinander gelöst hatten (also in ihrer Funktion gegenseitiger Stützung beeinträchtigt), zeigten sich auf der Oberfläche der Zellwand besonders starke Deformationen.
- Radialrisse traten bevorzugt im Bereich der Grenzfläche Holzstrahl/Tracheide auf und setzten sich vom Spätholz in das Frühholz fort, während sich Tangentialrisse auf das Spätholz beschränkten.

- Die Grenzfläche Holzstrahl/Tracheide erwies sich als Schwachstelle im Holzkörper, wobei die Holzstrahlen in radialer Richtung den Ausknickungen stabilisierend entgegenwirkten (bei stärkeren Stauchungen kommt es dort jedoch ebenfalls zu Verbiegungen) und somit die Knickungen in tangentialer Richtung erfolgten.

DINWOODIE konnte bereits einen Einfluß der Holzstrahlen auf die Entstehung von „slip planes“ und Initialstauchlinien nachweisen, indem er bei Zellwänden mit Kontakt zu Holzstrahlen drei mal so viel dieser Verformungen als in Tracheiden ohne Kontakt fand (DINWOODIE, 1981).

Als Normenvorschrift für die Druckfestigkeitsbestimmung parallel zur Faser gilt in Deutschland die DIN 52185 „Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser“ (FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG, 1976). Dort ist festgelegt, daß quaderförmige Proben mit Kantenlängen von 20 mm zu verwenden sind, wobei die Höhe der Proben in Faserrichtung das eineinhalbfache bis dreifache ihrer Kantenlänge betragen soll. Die Versuchskörper sind bei Normalbedingungen zu lagern, bis Gewichtskonstanz erreicht ist. Die Maximalkraft soll nach $1,5 \pm 0,5$ Minuten erreicht sein, und der Wert für die Druckfestigkeit parallel zur Faser errechnet sich aus dem Quotienten von erreichter Maximalkraft zur Querschnittsfläche der Probe vor Versuchsbeginn.

Bei *Zugbelastung* in Faserrichtung erweisen sich die Tüpfelränder und die Holzstrahlen aufgrund der induzierten Querkzugbelastung als Schwachstellen (ZIMMERMANN et al., 1994). Die Tüpfel selbst stellen jedoch wegen der besonderen Orientierung (konzentrische Anordnung) der Mikrofibrillen um die Tüpfel herum keine Schwachstellen dar. Durch Zugbelastung parallel zur Faser erfolgt zunächst eine Einschnürung der Zellen und Zellwände. Dadurch entstehen Querkzugkräfte, die einzelne Zellwandschichten voneinander trennt. Es erfolgt durch das vorangehende Versagen der S1-Schicht eine Spannungsumlagerung zur S2-Schicht (MARK, 1967). Die Fibrillenagglomerationen schnüren ein und es kommt zum endgültigen Bruch (ZIMMERMANN et al., 1994). Die DIN 52188 „Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser“ reglementiert die Prüfung der Zugfestigkeit in Faserrichtung (FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG, 1979a).

Bei *Scherbeanspruchung* parallel zur Faserrichtung muß man zwischen radialer und tangentialer Richtung unterscheiden. Die Scherfestigkeit ist nach NIEMZ (1993) in radialer Richtung (Holzstrahlebene) geringer als in tangentialer (parallel zum Jahresring, d.h. die Holzstrahlen werden senkrecht zu ihrer Längsachse abgeschert). KOLLMANN (1982) hingegen deutet an, daß beide annähernd gleich sind. Die Wirklichkeit dürfte bei grünem Holz zwischen den beiden Auffassungen liegen. Nadelhölzer besitzen nur im Bereich der Harzkanäle vielreihige, ansonsten hauptsächlich ein- oder zweireihige Holzstrahlen. Deshalb ist dort sehr wahrscheinlich die Scherfestigkeit in tangentialer Richtung niedriger als in radialer, da der Bruch durch das wenig scherfeste Frühholz geht. Bei den Laubhölzern mit mehrreihigen Holzstrahlen ist der umgekehrte Sachverhalt zu erwarten, weil die Holzstrahlen hier einen höheren Scherwiderstand darstellen. Die gültige Norm DIN 52187 „Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung“ beschreibt die Ermittlung der Scherfestigkeit an kleinen, fehlerfreien, würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 50 mm (FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG, 1979b). Die Scherfestigkeit τ wird dort als die auf den Anfangsquerschnitt (Scherfläche) bezogene Höchstkraft bei Scherbeanspruchung definiert.

2.2.2 Versagen und Festigkeitsermittlung von Holz quer zur Faserrichtung

Erfolgt die *Druckbelastung* quer zur Faser, so erweist sich die Druckfestigkeit in radialer Richtung (also in Holzstrahlrichtung) deutlich höher als in tangentialer Richtung. Die radial gerichteten Holzstrahlen übernehmen bei radialer Druckbelastung die Kraftübertragung, indem sie in ihrer Längsrichtung beansprucht werden. Dagegen werden bei tangentialer Druckbelastung sämtliche Zellen quer belastet (FREY-WYSSLING und STÜSSI, 1948).

Die Bestimmung der Druckfestigkeit quer zur Faser regelt die DIN 52192 „Druckversuch quer zur Faserrichtung“ (FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG, 1979c). Aufgrund der zunehmenden Verdichtung läßt sich hier häufig keine Druckfestigkeit quer zur Faser angeben, so daß dann nur die Druckspannung ermittelt werden kann, die einer definierten Gesamtverformung entspricht. Deshalb werden lediglich die erweiterte Proportionalitätsgrenze σ_{DP} (Spannung, bei der die Steigung der Tangente an die Spannungs-Weg-Kurve 2/3 der Steigung der Hooke'schen Geraden beträgt) und die Stauchgrenze σ_S (Spannung bei einer bestimmten, überproportionalen Stauchung ε_S) bestimmt. Unterschieden wird zwischen der Prüfung in tangentialer und radialer Richtung, weiter soll die Längsachse des Versuchskörpers das dreifache der Querschnittskante aufweisen. Ansonsten gelten die gleichen Bedingungen und Vorschriften wie bei der Prüfung parallel zur Faser.

Auch bei der *Querzugbelastung* von Holz muß zwischen radialer und tangentialer Beanspruchung unterschieden werden. Bei trockenen Proben ermittelte KOLLMANN etwa doppelt so hohe Werte der Querzugfestigkeit in radialer als in tangentialer Richtung (KOLLMANN, 1956). Bei tangentialer Querzugbelastung bestimmt die Holzstrahlebene den Bruchverlauf, der meistens einer Holzstrahlebene folgt. Bei radialer Querzugbelastung erfolgt der Bruch bei ring- oder halbringporigen Hölzern und Nadelhölzern vorherrschend im Frühholz; aufgrund der gegenüber dem Spätholz dünneren Zellwände und dem weniger vorhandenen Lignin; bei zerstreutporigen Hölzern meist unabhängig von der Struktur. Die Querzugfestigkeit von Holz beträgt nur zwischen 1,5 und 5% der Zugfestigkeit in Faserrichtung, aufgrund dieser Unzuverlässigkeit von Holz hat man in Deutschland davon abgesehen, Zugprüfungen senkrecht zur Faserrichtung zu normen. In anderen Ländern (vor allem in englischsprachigen und in Frankreich) wurden und werden oft x-förmige Proben mit über dem Querschnitt ungleichmäßigen Querspannungsverläufen und überlagerten Biegespannungen verwendet, was eher der Prüfung der Spaltfestigkeit als der Querzugfestigkeit entspricht (siehe Kapitel 3.1.2).

2.2.3 Die Bestimmung von Festigkeitskenngrößen mit dem Fractometer

Aufgrund der Zielsetzung, lokale Festigkeitsverteilungen und Festigkeitsrelationen in lebenden Bäumen zu bestimmen, der fehlenden Möglichkeit mit traditioneller Technik dies direkt vor Ort am Baum tun zu können, sowie nicht vorhandener Prüfverfahren zur Bestimmung von Querfestigkeiten, war die Entwicklung und Anwendung einer neuen Meßtechnik erforderlich. Im Forschungszentrum Karlsruhe wurden daher in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner „Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Wiesloch“ Fractometer entwickelt, mit deren Hilfe mehrere, verschiedene Festigkeitskennwerte aus \varnothing 5 mm- Bohrkernen ermittelt werden können. In Tabelle 2.1 sind die Möglichkeiten und Grenzen der Fractometer-Meßtechnik und der Normprüfung gegenübergestellt:

Kriterium	Fractometer	Normprüfung
Messung lokaler Festigkeiten möglich?	<u>ja</u> , geringe Probengröße Ø 5 mm- Bohrkern	<u>nein</u> , Probengröße zwischen 20 und 60 mm
Vergleich von Festigkeitskennwerten fast am selben Ort möglich?	<u>ja</u> , da geringe Probengröße und für alle Kennwerte gleiche Probengeometrie	<u>nein</u> , da unterschiedliche Probengeometrie je nach Kennwert und große Proben Verwendung finden
Messung unter Feldbedingungen am Baum möglich?	<u>ja</u> , Fractometer rein mechanisches Meßgerät mit Gewicht < 5 kg	<u>nein</u> , Probenherstellung nicht möglich, Großprüfmaschine
Messung ohne Fällung des Baumes möglich?	<u>ja</u>	<u>nein</u>
Messung grüner Festigkeiten möglich?	<u>ja</u> , direkte Messung nach Probenentnahme	<u>fraglich</u> , da große Wärmezufuhr und Zwischentrocknung bei Probenherstellung (Trocknungsrisse)
Kosten, Zeit- und Personalaufwand	<u>niedrig</u> <ul style="list-style-type: none"> • Bohrkernentnahme mit Zuwachsbohrer • fertige Probe wird direkt in Fractometer eingelegt und geprüft 	<u>hoch</u> <ul style="list-style-type: none"> • Fällung des Baumes • Herstellung der verschiedenen Probengeometrien • Dokumentation • Lagerung/Klimatisierung • Prüfung mit Großprüfmaschine

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung von Normprüfung und Fractometer-Meßtechnik anhand wichtiger Kriterien für die Durchführbarkeit der Messungen.

Die Bestimmung von Holzfestigkeiten mittels der Fractometer-Meßtechniken eröffnet völlig neue Möglichkeiten der Holzbewertung für die Wissenschaft, aber auch für die Praxis, z.B. als Diagnosegerät im Rahmen der Bewertung der Bruchsicherheit von Bäumen oder in der Holzindustrie. Vor allem die relativ zerstörungsarme Messung von Holzfestigkeiten am lebenden Baum liefert dem Sachverständigen dort, wo eine direkte Messung der Festigkeiten für die Beurteilung der Bruchsicherheit von Bäumen unbedingt erforderlich ist ein eindeutiges und quantifizierbares Ergebnis. So kann bei Fäulnisbefall oder hohlen Bäumen die Tragfähigkeit des befallenen Holzes oder der Restwand bestimmt werden. Für den Nachweis einer Holzzersetzung im lebenden Baum fand SCHWARZE (1994) im Vergleich zur Minderung der Schlagbiegefestigkeit ausschließlich mit dem Fractometer eine vergleichbare Sensibilität im Frühstadium der Holzzersetzung, das damit den zuverlässigen Nachweis der noch vorhandenen, tragenden Restwandstärke des untersuchten Baumes liefern kann. Untersuchungen mit Diagnosegeräten denen der Elastizitätsmodul bzw. die Rohdichte als Meßgrößen zugrunde liegen sind hingegen nicht geeignet, da diese Größen die vorletzte bzw. die letzte mechanische Größe darstellen, die während einer Holzzersetzung¹⁰ abnehmen (SCHWARZE, 1994).

¹⁰ Holzabbauerscheinungen von holzzersetzenden Pilzen werden allgemein in drei Gruppen unterteilt (SCHWARZE, 1994):

1. Braunfäule: selektive Entfernung von Hemizellulose und Zellulose.

Die Fractometerfamilie beinhaltet zum jetzigen Zeitpunkt drei Meßgerätetypen, das Fractometer I, II, und III. In der vorliegenden Arbeit wurden ausschließlich mit dem Fractometer II bzw. III Messungen durchgeführt. Abbildung 2.8 zeigt Bilder des Fractometer II bzw. III sowie die damit bestimmbareren Festigkeitskenngrößen.

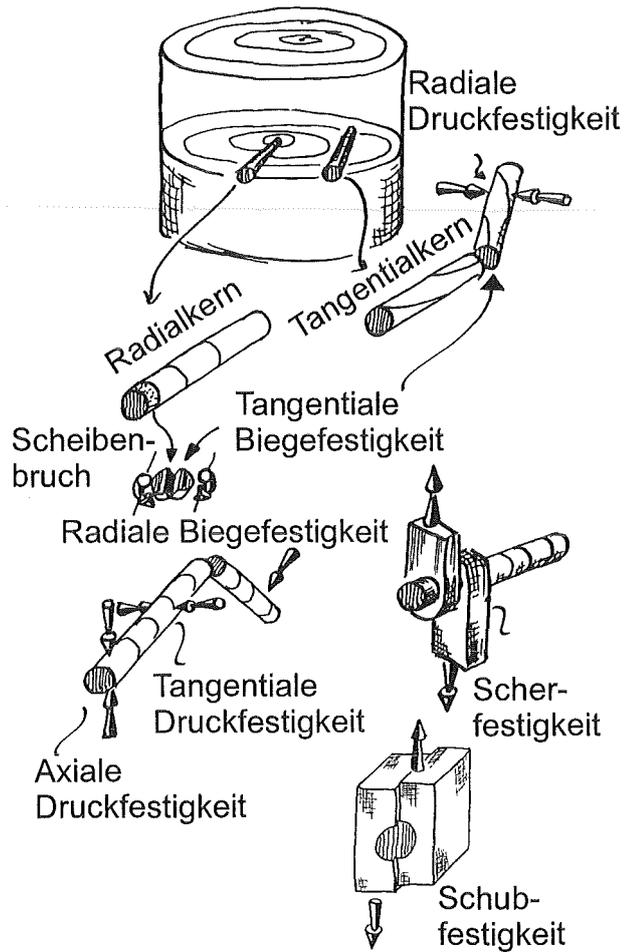
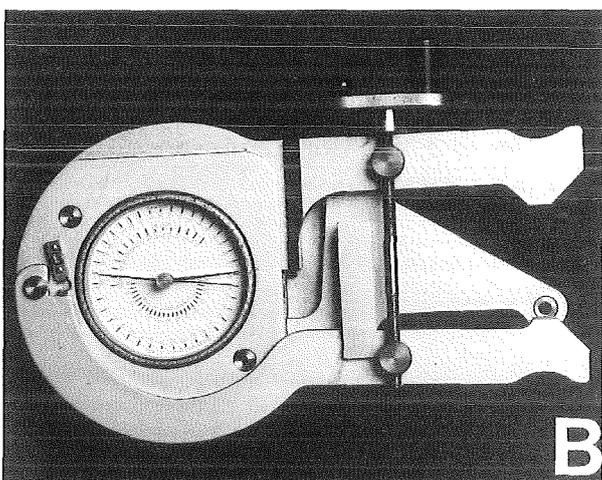
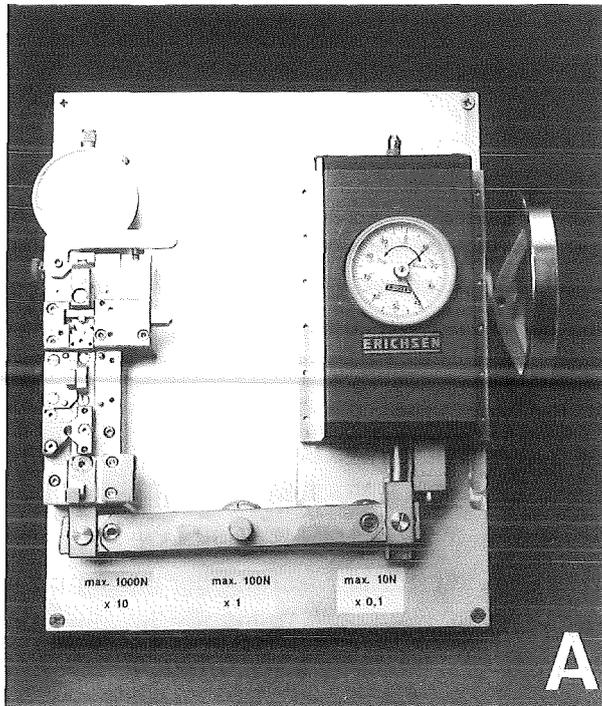


Abbildung 2.8: Festigkeitskenngrößen, die sich durch Bohrkernentnahme und anschließendes Prüfen mit dem Fractometer III (A), sowie teilweise mit dem Fractometer II (B) bestimmen lassen (Zeichnung: C. Mattheck).

2. Weißfäule: Es gibt zwei Typen:
 - a. simultaner Abbau von Lignin, Hemizellulose und Zellulose
 - b. selektive Delignifizierung (Abbau von Lignin).
3. Moderfäule: bevorzugtes Wachstum der Hyphen innerhalb der Sekundärwand und Abbau von Zellulosefibrillen.

Mit Hilfe des Fractometer II lassen sich aus einem \varnothing 5 mm-Bohrkern die Druckfestigkeit in tangentialer, radialer und axialer Richtung sowie die Biegefestigkeit in tangentialer (Tangentialkern) und radialer (Radialkern) Richtung bestimmen. Das Fractometer III ermöglicht zusätzlich die Messung der Schubfestigkeit in Faserrichtung (radiale und tangentielle Ebene), der Scherfestigkeit in Faserrichtung (radiale und tangentielle Ebene) sowie die tangentielle Biegefestigkeit an einer 2 mm dicken Scheibe, die von einem Radialkern abgetrennt wurde. Auf die Meßgrößen wird in Kapitel 3.1 nochmals näher eingegangen.

Die Wirkungsweise bzw. die Kraft- und Hebelverhältnisse des Fractometer II entsprechen prinzipiell denen eines Nußknackers mit zugeschalteter Meßuhr. Für die Prüfung der Druckfestigkeit in Faserrichtung wird der Bohrkern derart in der vorgesehenen Halterung plazierte, daß die Längsfasern parallel zur Beanspruchungsrichtung liegen und die spindelförmigen Holzstrahlquerschnitte mit ihrer Längsachse somit ebenfalls in Richtung der Belastung angeordnet sind. Durch langsames, gleichmäßiges Zusammendrücken der beiden Hebelarme oder durch optionales Drehen der seitlich angebrachten Handkurbel, wird die Bohrprobe bis zum Erreichen der Maximalkraft belastet, was sich durch eine abfallende Kraftanzeige bzw. Stehenbleiben des mitgeführten Schleppzeigers bemerkbar macht. Um die Versagensspannung bei Druckbelastung zu erhalten, wird die erreichte Maximalkraft nach dem Versuch anhand des Schleppzeigers abgelesen, aufgrund der Hebelverhältnisse mit 10 multipliziert und schließlich durch die Projektionsfläche dividiert. Zur Messung der tangentialen (Tangentialkern) bzw. radialen (Radialkern) Biegefestigkeit wird der Bohrkern in eine am Fractometer II fest montierte Hülse eingelegt und wie ein Kragträger an seinem freien Ende mit einer senkrecht angreifenden Kraft (Hebelarm des Fractometer II) belastet. Der Bohrkern wird immer derart belastet, daß die Holzstrahlen hochkant gebogen werden, entsprechend der Belastungssituation im stehenden Baum. Die Biegefestigkeit wird nach der Bernoulli'schen Biegetheorie berechnet, indem die angreifende Last aufgrund der Hebelverhältnisse halbiert und mit dem Hebelarm (Abstand zwischen Kraftangriffspunkt und Einspannquerschnitt) multipliziert (Biegemoment) sowie durch das Widerstandsmoment des \varnothing 5 mm-Bohrkernes dividiert wird. Abbildung 2.9 zeigt die am Fractometer II wirkenden Kräfte und Hebel.

Die Umrechnungsfaktoren in Abhängigkeit von der Kraftanzeige der Meßuhr lauten:

1. Druckfestigkeit:
$$\sigma_D = \frac{F_M(l_1 + l_2)}{A_P l_1} = 0,625 F_M$$

2. Biegefestigkeit:
$$\sigma_B = \frac{32 F_M l_B (l_1 + l_2)}{\pi d^3 (l_1 + l_2 + l_3)} = 0,45 F_M$$

F_M = Kraftanzeige Meßuhr

l_B = Abstand zwischen Kraftangriffspunkt und Einspannquerschnitt (11 mm)

l_1 = Abstand zwischen Lager A und Druckstempel (11 mm)

$l_1 + l_2$ = Abstand zwischen Lager A und Kraftangriffspunkt der Meßuhr (110 mm)

$l_1 + l_2 + l_3$ = Abstand zwischen Lager A und Probenaufnahme bei Messung der Biegefestigkeit (220 mm)

d = Durchmesser des Bohrkernes (5 mm)

A_P = Projektionsfläche der Druckstempel (16 mm²)

F_D = Druckkraft bei der Messung der Druckfestigkeit

F_B = Biegekraft bei der Messung der Biegefestigkeit

F_H = Mit Kurbel oder von Hand aufgebraachte, äußere Kraft

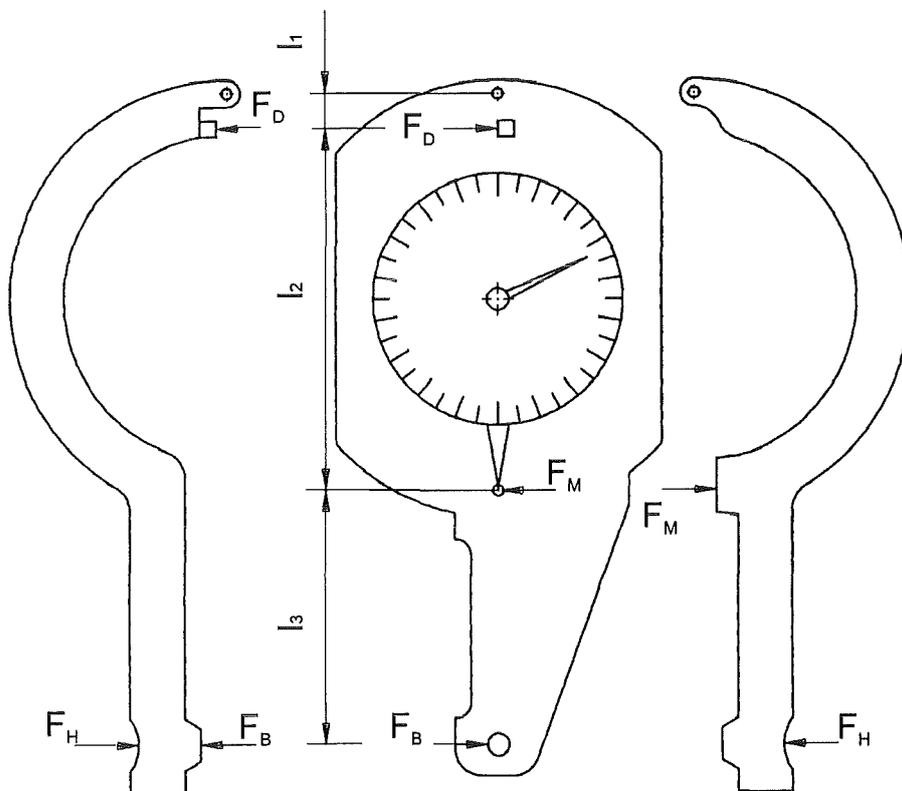


Abbildung 2.9: Am Fractometer II wirkende Kräfte und Hebel, wobei F_D und F_B nicht gleichzeitig, sondern nur bei Bestimmung der jeweiligen Meßgröße auftreten (Zeichnung: I. Tesari).

Die Messung dieser beiden Größen ist ebenfalls mit dem Fractometer III möglich. Je nach Festigkeitsprüfung erlaubt das Fractometer III durch drei variabel einstellbare Hebelverhältnisse drei verschiedene Meßbereiche einzustellen und somit die jeweils optimale Empfindlichkeit zu wählen. Durch eine Lochschiene (Hebel) werden der eigentliche Meßblock mit den fünf verschiedenen Prüfvorrichtungen und die lineare Kraftmeßuhr mit Schleppzeiger und Wegaufnehmer miteinander gekoppelt.

Die Schubfestigkeit wird aus der aufgewendeten Maximalkraft dividiert durch die Schubfläche bestimmt, der Bohrkern wird dabei in zwei „halbe“ Zylinder mit halbkreisförmigen Querschnitten geteilt. Für die Messung der tangentialen Biegefestigkeit an einem Radialkern wird von diesem mit einer Schneidevorrichtung eine 2 mm dicke Scheibe abgetrennt und bis zur Hälfte durch eine Spiralfeder über einen Hebel eingeklemmt, so daß die Klemmkraft immer die gleiche Größe besitzt. Mit einer senkrecht zur Scheibenebene angreifenden Kraft wird die Scheibe schließlich auf Biegung belastet bis Bruch eintritt. Die Bruchspannung errechnet sich aus der aufgebrachtten Maximalkraft multipliziert mit dem Hebelarm und dividiert durch das Widerstandsmoment der rechteckförmigen Bruchfläche. Es ergeben sich somit für die verschiedenen Festigkeitskennwerte bei entsprechender Einstellung des erforderlichen Meßbereichs folgende Umrechnungsfaktoren in Abhängigkeit von der Kraftanzeige der Meßuhr:

1. Biegefestigkeit, radial:

$$\sigma_B^r = \frac{M}{W} = \frac{Fl}{\pi d^3/32} = 0,9F \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige Meßuhr

l = Abstand Kraftarm - Einspannung (11 mm)

d = Durchmesser Bohrkern (5 mm)

2. Schubfestigkeit in Faserrichtung, radial:

$$\sigma_s^r = \frac{F}{A} = \frac{F}{bh} = \frac{F}{25} \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige Meßuhr

b = Breite der Schubfläche (5 mm)

h = Höhe der Schubfläche (5 mm)

3. Druckfestigkeit in Faserrichtung:

$$\sigma_D^l = \frac{F}{A} = \frac{F}{bh} = \frac{F}{15} \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige Meßuhr

b = Breite der Druckstempel (3 mm)

h = Höhe der Druckstempel (5 mm)

4. Biegefestigkeit, tangential (Scheibe):

$$\sigma_B^l = \frac{M}{W} = \frac{Fl}{bh^2/6} = 0,79F \quad \text{in MPa}$$

F = Kraftanzeige Meßuhr

l = Abstand Kraftarm - Einspannung (1.9 mm)

b = Breite der Scheibe (5 mm)

h = Höhe der Scheibe (1.7 mm)

2.2.4 Durchführung der Messungen

Bei sämtlichen Festigkeitsmessungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde immer die in Kapitel 2.1.2 erläuterte „biologische Festigkeit“ gemessen, also die von saftfrischen, grünen und unmittelbar dem stehenden Baum entnommenen Holzproben. Die Probenentnahme erfolgte am stehenden Baum mit Hilfe eines scharfen Zuwachsbohrers¹¹ der Fa. Suunto (SUUNTO, 1993), wie er auch von Dendrologen zur Jahrringanalyse verwendet wird. Nach Auswahl der gewünschten Entnahmestelle und der Zielsetzung (Radial- oder Tangentialkern, Ort, Bohrkernlänge) wird mit dem ausgerichteten Zuwachsbohrer die gewünschte Bohrprobe aus dem Baum herausgestanzt bzw. herausgeschnitten, mit einer dünnen Metallzunge für den sich direkt anschließenden Prüfungsvorgang dem Zuwachsbohrer entnommen und schließlich mit dem Fractometer geprüft. Die für die jeweiligen Untersuchungen gewählten Probenentnahmestellen werden in Kapitel 3 begleitend zu den Ergebnissen dargestellt.

Grundsätzlich ist bei allen Messungen darauf zu achten, daß

- die Bohrkernentnahme eines Radialkernes immer senkrecht zur Baumoberfläche in Richtung des Marks erfolgt; nach der Bohrkernentnahme ist zu kontrollieren, ob die Holzstrahlen parallel zur Bohrkernlängsachse liegen und nur der Bereich ist zu prüfen, der parallele Holzstrahlen besitzt.
- die Prüfung direkt nach der Bohrkernentnahme erfolgt (Feuchtigkeitsverlust).
- der Bohrkern richtig in die vorgesehene Prüfvorrichtung eingelegt und ausgerichtet wurde.
- der Prüfungsvorgang langsam und gleichmäßig erfolgt.
- keine Unregelmäßigkeiten oder Fehler im Holz vorliegen; falls dort Messungen unvermeidbar sind, sollten alle Besonderheiten exakt dokumentiert werden.
- zwischen den einzelnen Bohrkernentnahmestellen ein entsprechender Abstand zur Vermeidung gegenseitiger Beeinflussung eingehalten wird.
- nur scharfe Zuwachsbohrer verwendet werden, da bei beschädigten oder ungleichmäßig geschliffenen Bohrern Vorschäden am Bohrkern entstehen und das Meßergebnis beeinflussen können.

¹¹ Hohlbohrer mit \varnothing 5 mm Innendurchmesser der Schneide und nach innen konischem Verlauf bis auf \varnothing 6,3 mm, so daß der Bohrkern nahezu über seine gesamte Länge nicht an der Innenwand anliegt und nicht durch Reibungseffekte beschädigt wird.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Einfluß der Probengeometrie bei der Festigkeitsermittlung von Holz

3.1.1 Druckfestigkeitsprüfung

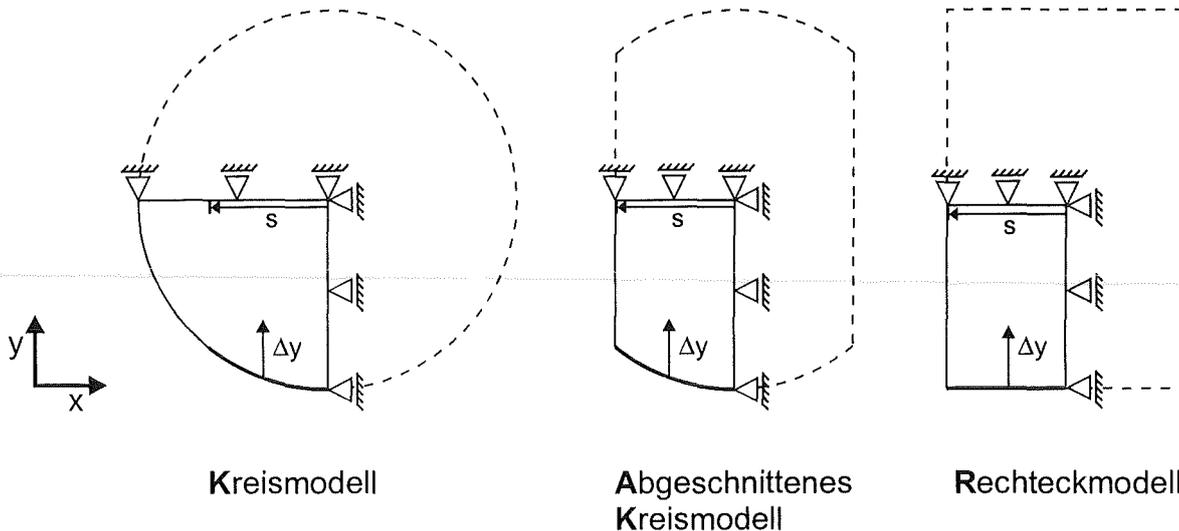
Die Vorzüge und die Notwendigkeit der Entwicklung der Fractometer-Meßtechnik wurden bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert. Parallel zur Entwicklung der Fractometer wurden vergleichende Messungen und Rechnungen durchgeführt, um die erzielten Meßergebnisse im Idealfall denen bereits vorhandener Meßverfahren gegenüberstellen zu können. Für die grundsätzliche Anwendbarkeit ist dies jedoch nicht zwingend notwendig. Besteht dazu keine Möglichkeit (z.B. wegen nicht vorhandener Normprüfverfahren) oder gibt es unvermeidbare prinzipielle Unterschiede (z.B. mögliche Größeneffekte), sollen die Unterschiede quantifiziert, die Einflußfaktoren und Schwachstellen aufgedeckt sowie Erfahrungswerte für die zuverlässige Benutzung als Meßgerät gesammelt werden. Besondere Schwierigkeiten birgt hierbei das zu untersuchende Material Holz mit seinen bereits im Kapitel 2 vorgestellten, orthotropen Materialeigenschaften. Zur Bestimmung der Druckfestigkeit in Faserrichtung wird beim Fractometer ein 5 mm-Bohrkern zwischen zwei konkaven Druckstempeln mit einer Breite von 3,15 mm bis zum Einsetzen des Versagens zusammengedrückt. Bemerkbar wird das Versagen nach Erreichen der Maximalkraft der Kraftanzeige durch einen merklichen Kraftabfall. Die beiden äußeren, unbelasteten Enden des Bohrkernes werden dabei ohne erkennbare Verformung abgeschert. Das makroskopisch sichtbare Versagen erfolgt bei Hölzern mit mehrreihigen Holzstrahlen meist ausgehend von der Grenzfläche der Holzstrahlen zu den umgebenden Fasern. Um einen Eindruck vom Belastungszustand, d.h. der Spannungsverteilung und der Größenordnung der auftretenden Spannungen beim Druckversuch mit dem Fractometer im Vergleich zu Druckprüfverfahren mit quaderförmigen Proben zu erhalten, wurden an drei ausgewählten Modellgeometrien Finite-Elemente-Rechnungen mit jeweils isotropen und orthotropen Materialeigenschaften durchgeführt. Hierbei werden wegen des komplexen Aufbaus von Holz und der damit verbundenen schwierigen Modellierung lediglich grundsätzliche Tendenzen aufgezeigt. Um praxisrelevante Aussagen über eventuelle Geometrie- oder Größeneinflüsse zu erlangen, wurden verschiedene Vergleichsmessungen, meist an Buchenholz wegen seines relativ gleichmäßigen Aufbaus (zerstreutporige Gefäßanordnung), durchgeführt. Die Bäume, denen die Proben entnommen wurden, waren immer fehlerfrei und gerade, um wachstumsbedingte Festigkeitsschwankungen zu vermeiden. Begleitend zu den Messungen erfolgte stets die Beobachtung des Versagensvorgangs, auch mit Hilfe der Lichtmikroskopie, um Erfahrungen zu sammeln und Aussagen über z.B. den Ort des Versagensbeginns oder die auftretenden Bruchformen treffen zu können.

Die Modellgeometrien für die Finite-Elemente-Rechnungen wurden derart gewählt, daß

- die erste Geometrie (Kreismodell) mit einem \varnothing 5 mm Kreisquerschnitt in seinen Abmessungen einem Bohrkernquerschnitt,
- die zweite Geometrie (abgeschnittenes Kreismodell) einem an beiden Seiten abgeschnittenen \varnothing 5 mm Kreisquerschnitt mit der gleichen Breite wie die Druckstempel (Breite: 3,15 mm) des Fractometer II bzw. III,

- die dritte Geometrie (Rechteck) einem rechteckigen Querschnitt mit einer Breite von ebenfalls 3,15 mm und einer Höhe von 5 mm entsprach.

In Abbildung 3.1 sind alle Modelle sowie die Material- und Geometriedaten für die Finite-Elemente-Rechnungen dargestellt.



Material- und Geometriedaten:

- Durchmesser (Kreismodell)= 5 mm
- Rechteck (B×H)=3,15 mm × 5 mm
- Ebener Dehnungszustand (EDZ)
- $\Delta y=0,01\text{ mm}$
- $\mu=0,5$ (Metall/Holz)
- s =Darstellungslinie für xy -Diagramm
- isotrope Rechnung:
 $E_{\text{isotrop}}=9800\text{ MPa}$; $\nu_{\text{isotrop}}=0,3$
- orthotrope Rechnung:
 $E_x=980\text{ MPa}$; $\nu_{xy}=0,05$; $G_{xy}=833\text{ MPa}$
 $E_y=9800\text{ MPa}$; $\nu_{xz}=0,7$; $G_{xz}=196\text{ MPa}$
 $E_z=490\text{ MPa}$; $\nu_{yz}=0,6$; $G_{yz}=588\text{ MPa}$

Abbildung 3.1: Material- und Geometriedaten der Finite-Elemente-Modelle, sowie Belastung und Randbedingungen der Finite-Elemente-Rechnungen für den rechnerischen Vergleich verschiedener Geometrien beim Druckversuch an Holz.

Aus Symmetriegründen wurden die Rechnungen mit Viertelmodellen durchgeführt, so daß sich die Geometriedaten der eigentlichen Modelle halbieren. Alle Viertelmodelle wurden durch eine Verschiebung einer 1,575 mm breiten Kontaktelementschicht am unteren Ende um 0,01 mm in y -Richtung auf Druck belastet; das Kreismodell wurde somit an seinem linken, äußeren Ende nicht belastet. Die Rechnung erfolgte mit dem FEM-Programm ABAQUS (HIBBITT et al., 1995), linear-elastisch und mit ebenem Dehnungszustand. Die Materialdaten entsprechen denen von Buchenholz (LAVERS, 1983; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987). Die Ergebnisse der Rechnungen (Längs-, Quer-, Schubspannungen) sind in den Abbildungen 3.2 bis 3.7 zum einen als Spannungsverteilungen mittels Graustufenverläufen, zum anderen entlang der oberen Berandungslinie der Modelle in xy -Diagrammen dargestellt.

Die Verteilungen der Längsspannungen (parallel zur Verschiebung und Faserrichtung) waren beim Rechteckmodell sowohl bei isotroper, als auch bei orthotroper Rechnung ähnlich. Es existierten je zwei Gebiete maximaler Längsspannung (Ecke zwischen Belastungsfläche und freier Seite bzw. gegenüberliegende Ecke, also Mitte des Vollmodells), sowie zwei Gebiete minimaler Längsspannung (freie Seite oberhalb Ecke der Belastungsfläche bzw. kleiner Bereich oberhalb der Belastungsfläche) mit jedoch nur geringen Abweichungen. Die Maximal- bzw. Minimalwerte beim Rechteckmodell betragen bei der isotropen Rechnung -42,6 bzw. -49,1 MPa und bei der orthotropen -38,8 bzw. -52,8 MPa. Die Bereiche maximaler und minimaler Längsspannungen entsprachen denen beim abgeschnittenen und vollem Kreismodell, wenngleich die Größenordnungen und Ausdehnungen jeweils variierten. Beim abgeschnittenen und vollen Kreismodell nahmen bei den orthotropen Rechnungen die Längsspannungen kontinuierlich von innen nach außen hin ab und gingen beim vollen Kreismodell außerhalb des Belastungsbereichs in Zugspannungen über. Ausnahmen waren die unteren, linken Ecken mit höheren Drucklängsspannungen. Bei den isotropen Rechnungen waren die Längsspannungen ähnlich verteilt, jedoch mit deutlich niedrigeren Minimalwerten an den unteren, linken Ecken beim Kreismodell mit -111 MPa und beim abgeschnittenen Kreismodell mit -129 MPa. Entsprechend den orthotropen Rechnungen nahmen die Längsspannungen von innen nach außen ab und waren ebenfalls deutlich negativer, also betragsmäßig höher.

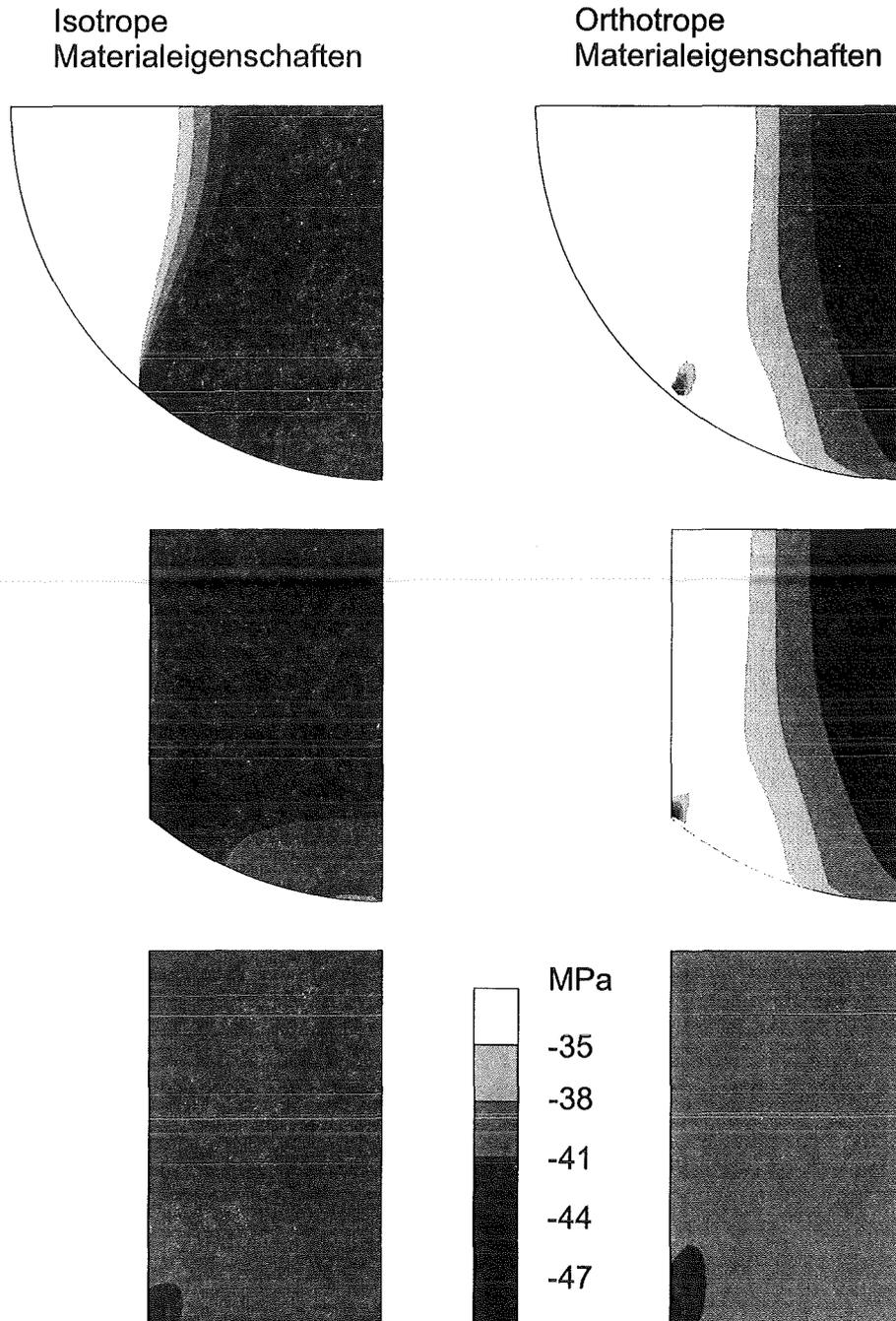
Die Verteilung der Querspannungen (senkrecht zur Verschiebung und Faserrichtung) waren bei allen Modellen sowohl im isotropen, als auch im orthotropen Fall ähnlich. Sie unterschieden sich jedoch erheblich in ihren Größenordnungen. Die minimalen Querdruckspannungen betragen beim Rechteck isotrop -2,98 bzw. orthotrop -2,02 MPa, beim abgeschnittenen Kreismodell isotrop -81,6 bzw. orthotrop -24,1 MPa, und schließlich beim Kreismodell isotrop -133 bzw. orthotrop -20,9 MPa. Als eine Folge der in den Berührungsflächen, hier der Kontaktelementschicht und der unteren Elementschicht der Modelle, auftretenden Reibung wurde die durch die Stauchung der Probe bedingte Querschnittszunahme an den Probenenden gehemmt. Bei der Prüfung von Holzproben wird durch die in Querrichtung zusätzlich auftretenden Druckspannungen der Verformungswiderstand in Längsrichtung (Faserrichtung) gesteigert. Die Vergrößerung des Querschnitts ist dort geringer als in der Mitte der Probe, es entsteht also eine Zone geringer Verformung und es bildet sich eine charakteristische Tonnenform wie bei anderen, weniger spröden Stoffen. Bei spröden Stoffen führt diese kegelmantelförmige Zone hoher Schubspannungen, die aus dem Zusammenwirken von Reibungs- und Druckkräften entsteht, zu einem Abgleiten des „Rutschkegels“. Bei dem abgeschnittenen und vollen Kreismodell wurde diese Zone durch das in y-Richtung verschobene Kreissegment (Kontaktelementschicht) zusätzlich zusammengedrückt und dieser Effekt verstärkt. Somit wird bei einer Druckprüfung mit dem Fractometer der Bohrkern immer in der Mitte seines Querschnitts zu versagen beginnen, was sich in der Praxis auch bestätigt. Die Verteilung der Schubspannungen parallel zur Belastungsrichtung war bei allen Modellen derart, daß am linken, unteren Ende der Belastungsfläche ein Gebiet höherer Schubspannungen auftrat, im Vergleich zur restlichen Struktur mit sehr geringen, nahezu homogen verteilten Schubspannungen. Die minimalen Schubspannungen betragen beim Rechteck isotrop -2,37 bzw. orthotrop -2,45 MPa, beim abgeschnittenen Kreismodell isotrop -108 bzw. orthotrop -30,9 MPa, und schließlich beim Kreismodell isotrop -49,4 bzw. orthotrop -16,3 MPa.

Sie bewirken bei der Druckprüfung von Holz mit dem Fractometer zusammen mit den dort wirkenden Querdruckspannungen ein Abspalten und Abscheren der beiden äußeren Enden des Bohrkerns.

Die Spaltfestigkeit und Scherfestigkeit von Holz ist in Faserrichtung sehr gering, so daß die äußeren Enden des Bohrkerns schon bei geringen Belastungen unverformt abgetrennt werden und somit deren Existenz keinen Einfluß auf die Druckfestigkeitsmessung hat.

Die Abbildungen 3.3, 3.5 und 3.7 zeigen die Spannungsverteilungen der Modelle jeweils für den isotropen und orthotropen Fall entlang einer horizontalen Linie von der rechten, oberen Kante der Modelle ausgehend nach außen, also von der Mitte der Vollmodelle nach außen (siehe Abbildung 3.1). Es zeigte sich, daß in dem Bereich von dem beim Druckversuch das Versagen ausgeht im orthotropen Fall nahezu ein einachsiger Spannungszustand vorlag und die Längsspannungen beim Rechteckmodell nur sehr leicht nach außen hin abfielen. Sie betragen im inneren Bereich der Vollmodelle (0,75 mm links und rechts von der Mitte) zwischen -41 und -40 MPa. Beim abgeschnittenen und beim vollen Kreismodell fielen sie ebenfalls von innen nach außen ab und lagen im inneren Bereich der Vollmodelle zwischen -44 und -40 MPa mit einem weiteren starken Abfall nach außen hin. Die rechnerisch ermittelte maximale Abweichung der Längsspannungen zwischen abgeschnittenem bzw. vollem Kreismodell und Rechteckmodell lag bei 3 MPa oder 6,8 % im für das Versagen relevanten Bereich.

Dies zeigt, daß der Bohrkern in Bezug auf seine Maximalspannungen am Versagensort durchaus als Druckprobe geeignet ist, die kreisbogenartige Lasteinleitungsfläche keine Verfälschungen gegenüber der geraden Lasteinleitungsfläche bewirkt und daß, selbst wenn die Seiten einmal nicht abgesichert werden sollten, keine Verfälschungen der Druckfestigkeitsmessung zu erwarten sind.



Berechnete Spannungsverteilungen parallel zur Belastungsrichtung (in Faserrichtung)

Abbildung 3.2: Berechnete Spannungsverteilungen verschiedener Probengeometrien parallel zur Belastungsrichtung (in Faserrichtung) für den isotropen und den orthotropen Fall, dargestellt als Graustufenflächen.

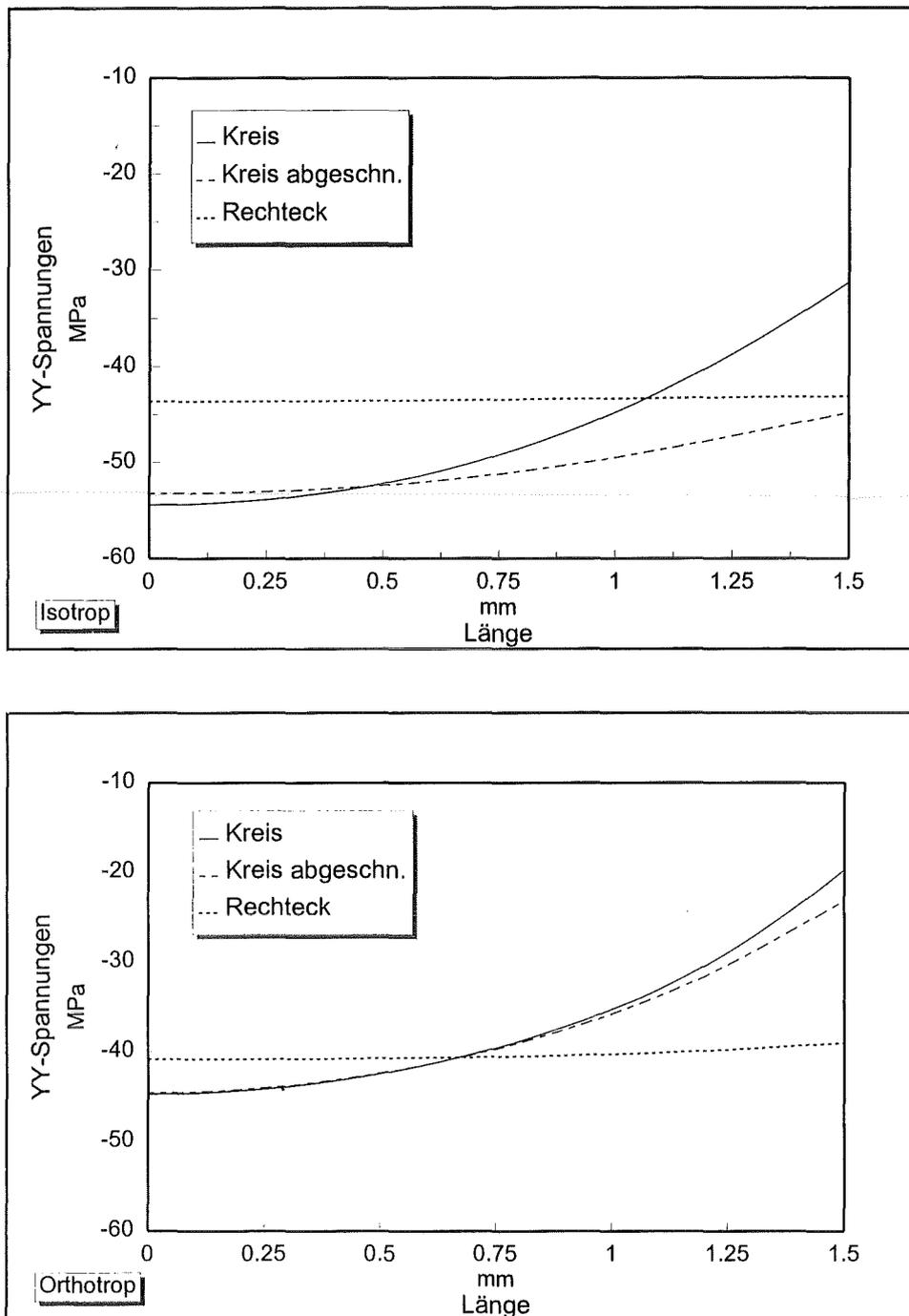
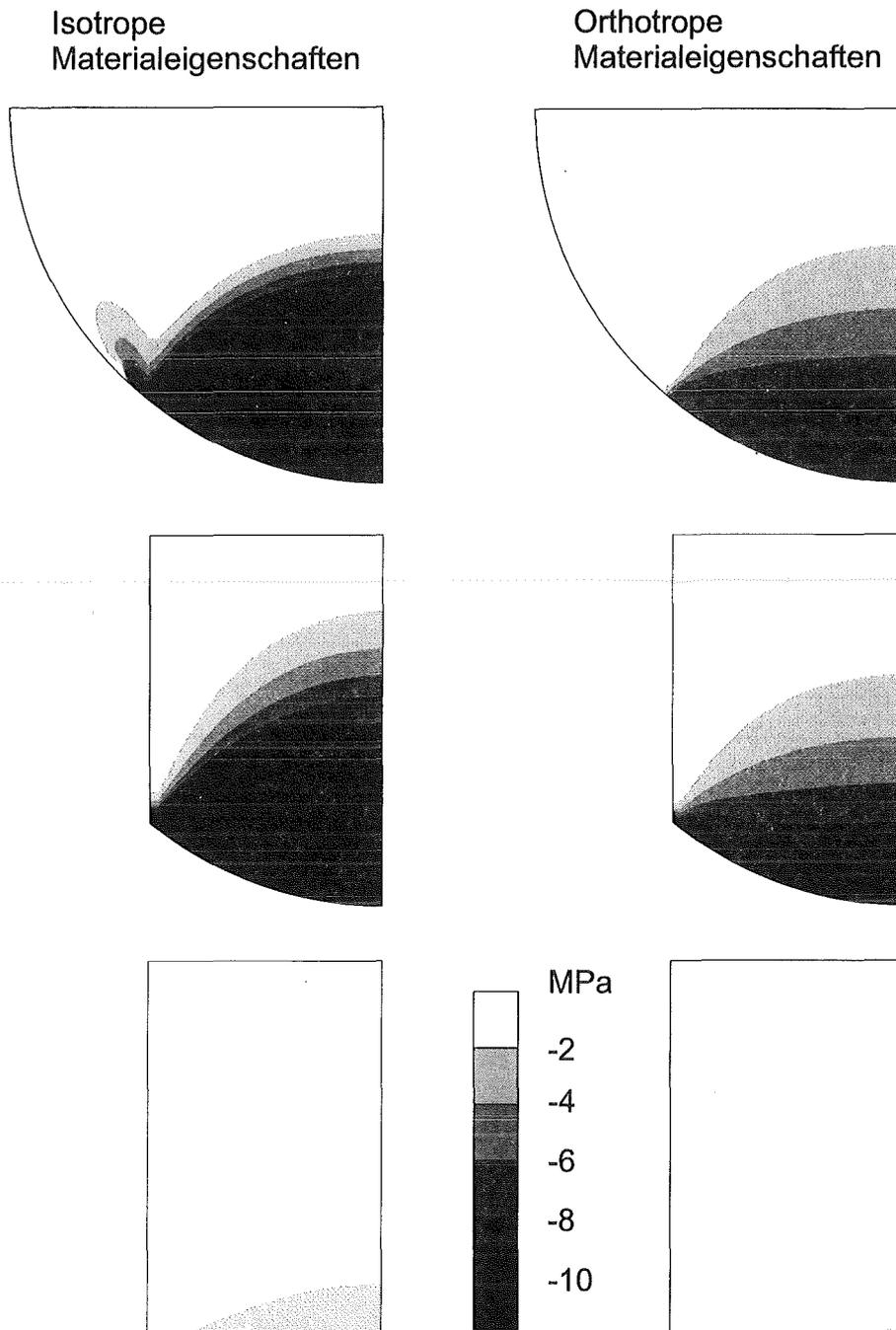


Abbildung 3.3: Berechnete Spannungsverteilungen verschiedener Probengeometrien parallel zur Belastungsrichtung (in Faserrichtung) entlang der Linie s aus Abb. 3.1 für den isotropen und den orthotropen Fall.



Berechnete Spannungsverteilungen senkrecht zur Belastungsrichtung (quer zur Faserrichtung)

Abbildung 3.4: Berechnete Spannungsverteilungen verschiedener Probengeometrien senkrecht zur Belastungsrichtung (quer zur Faserrichtung) für den isotropen und den orthotropen Fall, dargestellt als Graustufenflächen.

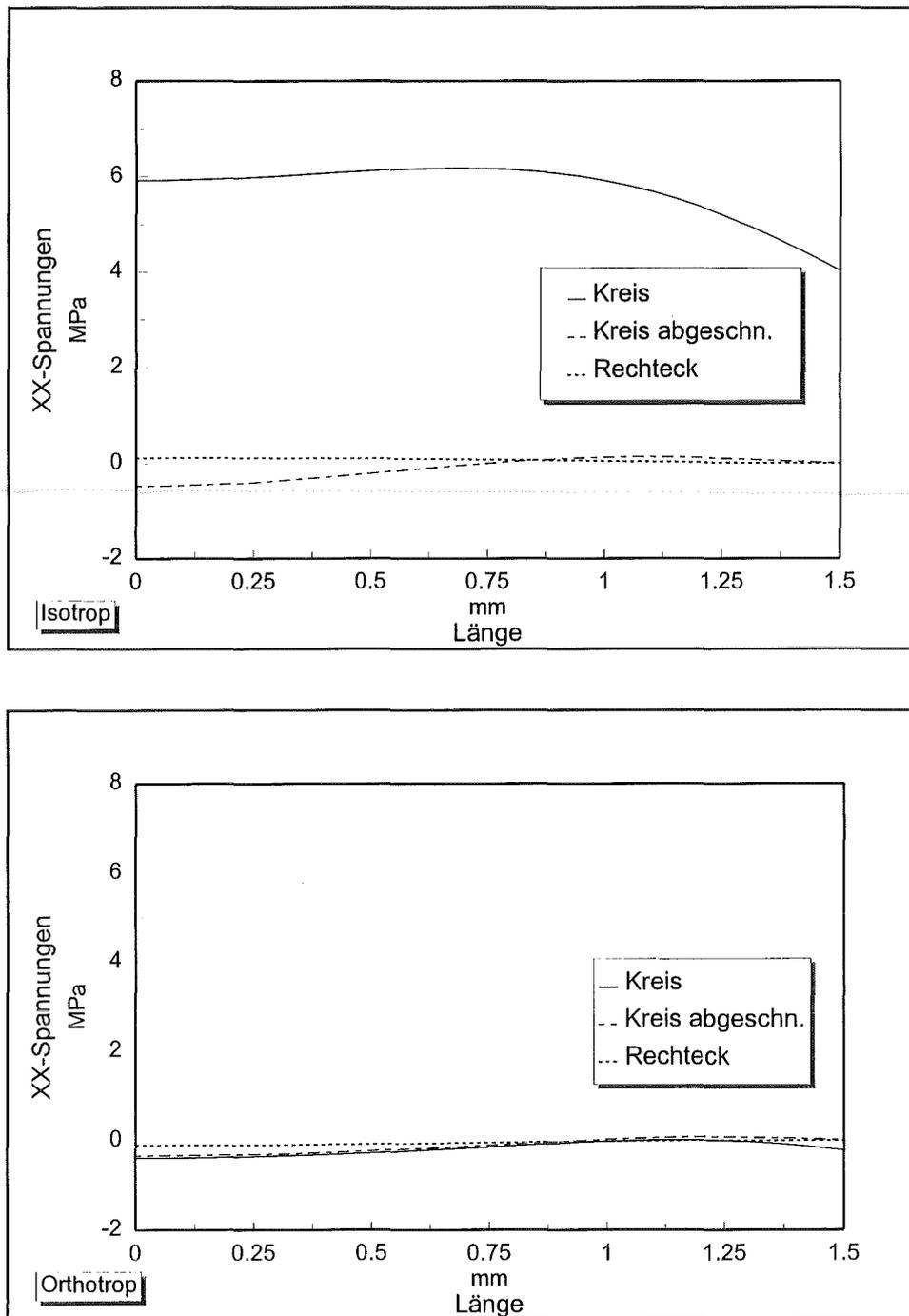
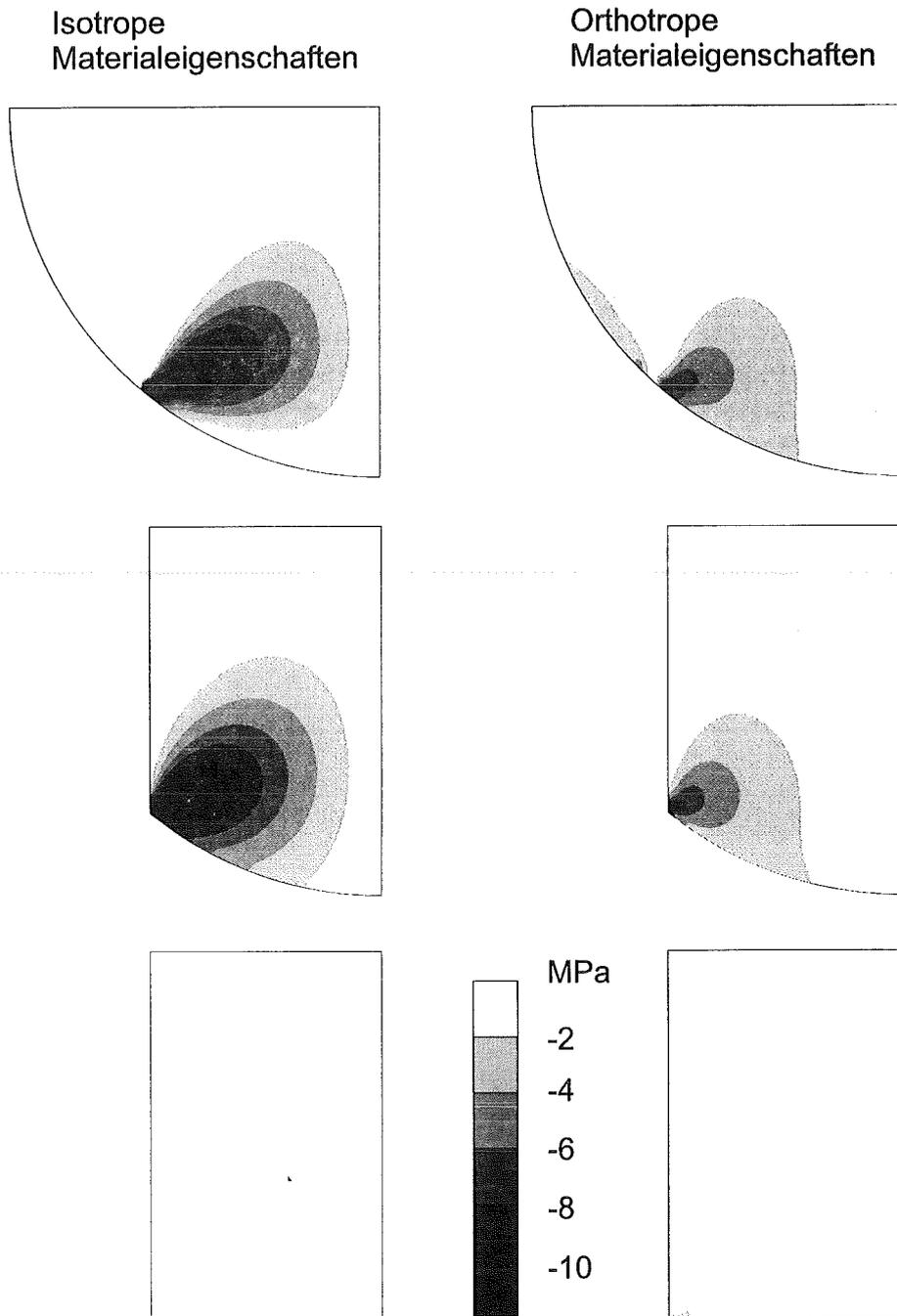


Abbildung 3.5: Berechnete Spannungsverteilungen verschiedener Probengeometrien senkrecht zur Belastungsrichtung (quer zur Faserrichtung) entlang der Linie s aus Abb. 3.1 für den isotropen und den orthotropen Fall.



Berechnete Schubspannungsverteilungen parallel zur Belastungsrichtung (in Faserrichtung)

Abbildung 3.6: Berechnete Schubspannungsverteilungen verschiedener Probengeometrien parallel zur Belastungsrichtung (in Faserrichtung) für den isotropen und den orthotropen Fall, dargestellt als Graustufenflächen.

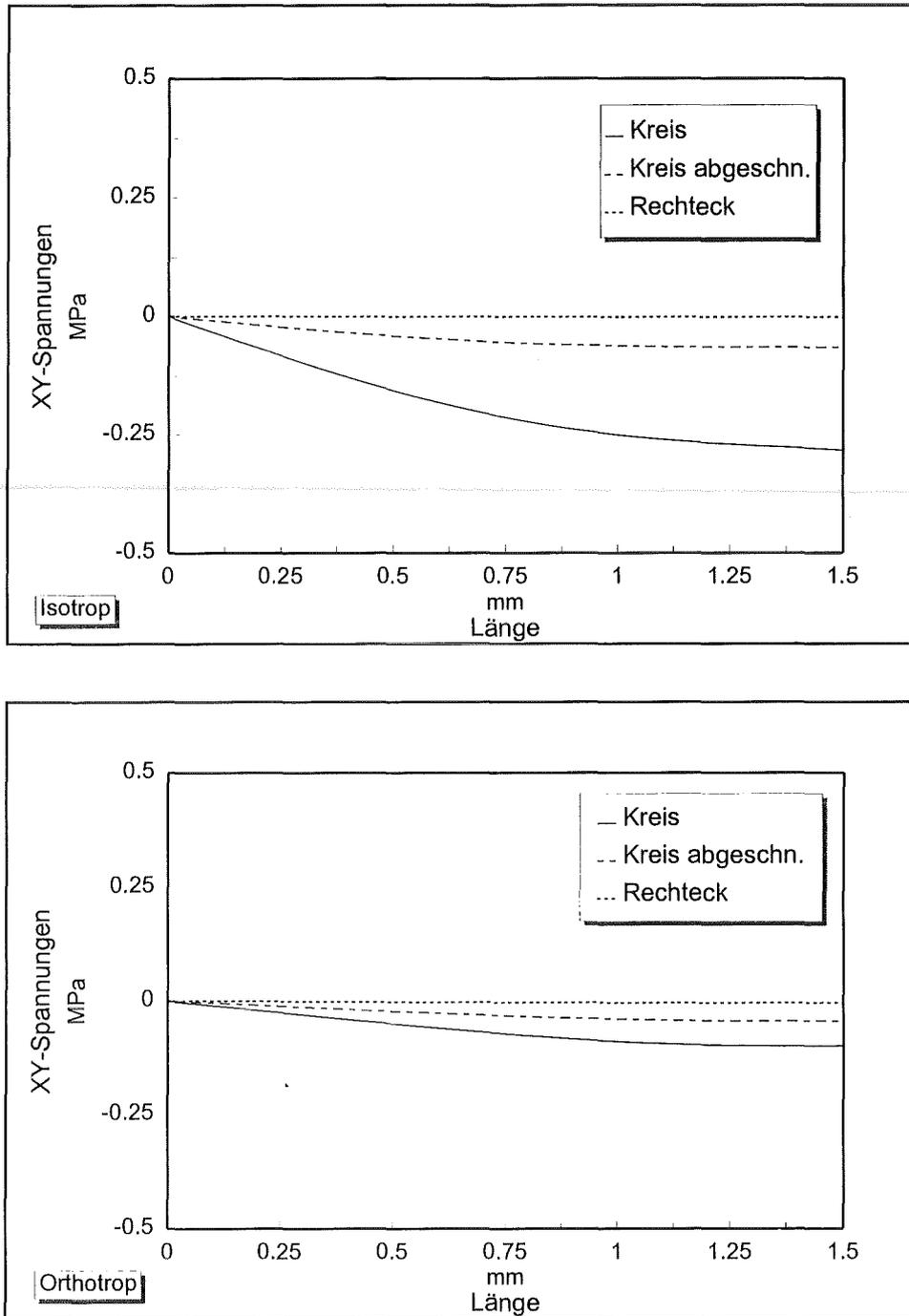


Abbildung 3.7: Berechnete Schubspannungsverteilungen verschiedener Probengeometrien parallel zur Belastungsrichtung (in Faserrichtung) entlang der Linie s aus Abb. 3.1 für den isotropen und den orthotropen Fall.

Um bei Druckmessungen an Holzproben die unterschiedlichen Geometrien hinsichtlich ihres Einflusses auch experimentell zu bewerten, wurden verschiedene Untersuchungen an grünem Holz durchgeführt.

Zunächst wurden einer Buche sechs Bohrkern in Abständen von 5 cm, beginnend ab 120 cm Höhe, vertikal nach unten entnommen. Die Bohrkern 1, 3, 5 wurden mit einer Fräsmaschine unter ständiger Benetzung mit Wasser derart bearbeitet, daß ein quaderförmiger Körper mit einer Breite von 3,15 mm, einer Höhe von 3,9 mm und einer Länge von 5 mm entstand. Die exakten Maße wurden nach dem Fräsvorgang an der fertigen Probe ermittelt. Die Quader wurden anschließend entsprechend ihrer Lage im Baum von außen nach innen einzeln mit einer Instron-Prüfmaschine bis zum Versagen (Erreichen der Höchstkraft) auf Druck belastet. Die Bohrkern 2, 4, 6 wurden mit dem Fractometer II ebenfalls von außen nach innen bis zum Versagen (Erreichen der Höchstkraft) auf Druck belastet, nachdem sie in 5 mm hohe Zylinder geschnitten wurden. Die Versuchsdauer, der Feuchtegehalt und die Prüftemperatur waren bei beiden Prüfverfahren identisch, ebenso die Abstände zwischen den einzelnen Probekörpern. In Abbildung 3.8 sind die Ergebnisse der beiden Prüfverfahren dargestellt. Die Mittelwerte (dicke, horizontale Linie) und die Standardabweichungen (dünne, horizontale Linien) waren bei beiden Verfahren nahezu identisch und die einzelnen Meßwerte zeigten bei beiden Verfahren einen ähnlichen Verlauf.

Bei weiteren Vergleichsmessungen wurden ebenfalls \varnothing 5 mm-Bohrkerne mit dem Fractometer II und quaderförmige Proben mit einer Breite von 3,2 mm, einer Höhe von 3,9 mm und einer Länge von 5 mm mit einer Instron-Prüfmaschine getestet und gegenübergestellt. Im Gegensatz zu den erstgenannten Vergleichsmessungen wurde nun fünf verschiedenen Bäumen (drei Buchen und zwei Robinien) je ein Bohrkern entnommen und wie in Abbildung 3.9 skizziert, abwechselnd mit dem Fractometer II bzw. die quaderförmigen Proben mit einer Instron-Prüfmaschine die jeweilige Druckfestigkeit bestimmt. Die Prüfbedingungen waren wiederum für beide Verfahren identisch. In Abbildung 3.10 werden jeweils die Mittelwerte der mit dem Fractometer bzw. mit der Instron-Prüfmaschine erzielten Meßwerte entlang eines Bohrkernes verglichen. Die eingezeichnete Zahl gibt das Verhältnis der Mittelwerte von Instron- zu Fractometer-Messung an. Die Verhältnisse bei den untersuchten Buchen betragen 0,99, 1,01 und 1,06 sowie bei den Robinien 0,92 und 0,9. Unter Berücksichtigung der stärkeren Streuung des natürlichen Werkstoffes Holz, im Vergleich zu „technischen“ Konstruktionswerkstoffen, die hier nochmals für alle nachfolgenden Messungen betont werden soll, lag bei den Buchen eine hervorragende Übereinstimmung der Meßwerte vor. Bei den ringporigen Robinien war ein leichter Trend zu geringeren Meßwerten bei den Messungen mit der Instron-Prüfmaschine festzustellen. Abbildung 3.11 zeigt die Probenentnahmestellen und Geometriedaten bei einer weiteren Vergleichsmessung zwischen Fractometermeßtechnik (zylindrischer Bohrkern) und der Messung der Druckfestigkeit mit einer Instron-Prüfmaschine (würfelförmige Probe der Kantenlänge 8 mm). Die 8 mm-Würfel wurden unter ständigem Benetzen mit Wasser aus einem 12 mm-Bohrkern einer Buche herausgefräst. Die Entnahme erfolgte mit Hilfe eines 12 mm-Zuwachsbohrers der Fa. SUUNTO (SUUNTO, 1993). Es wurden zwei Versuchsreihen mit jeweils neun Bohrkernen durchgeführt, wobei je fünf 5 mm-Bohrkerne und vier 12 mm-Bohrkerne (8 mm-Würfel) in abwechselnder Reihenfolge von ca. 130 cm Höhe ab vertikal nach unten entnommen und geprüft wurden. Die Prüfbedingungen waren wiederum für beide Verfahren identisch. In Abbildung 3.12 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsmessungen dargestellt.

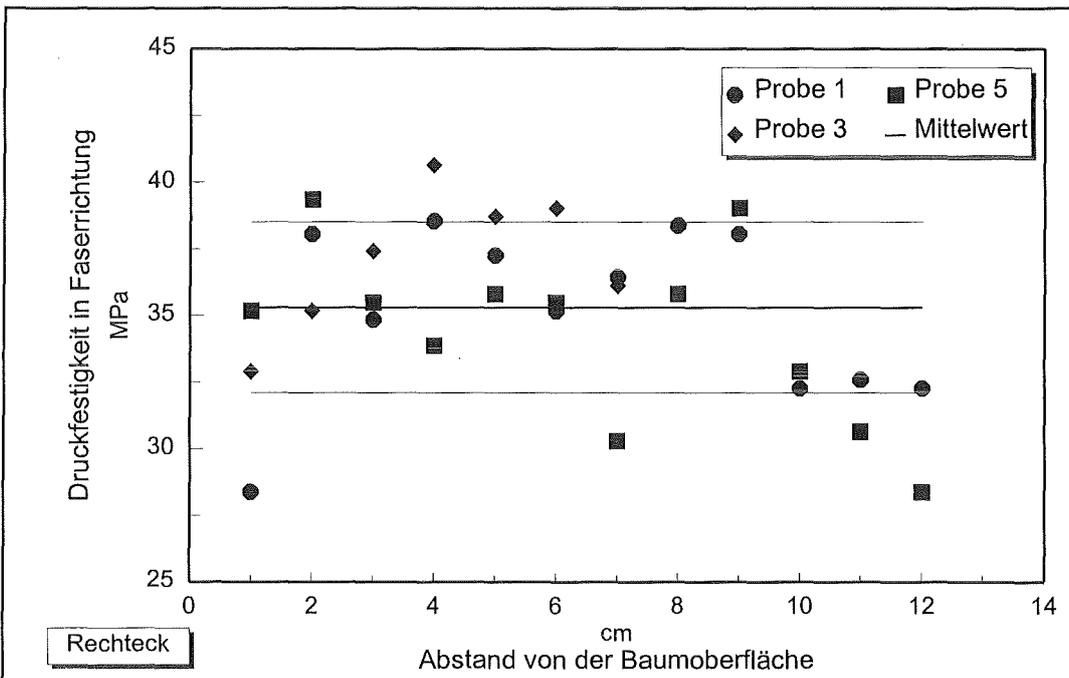
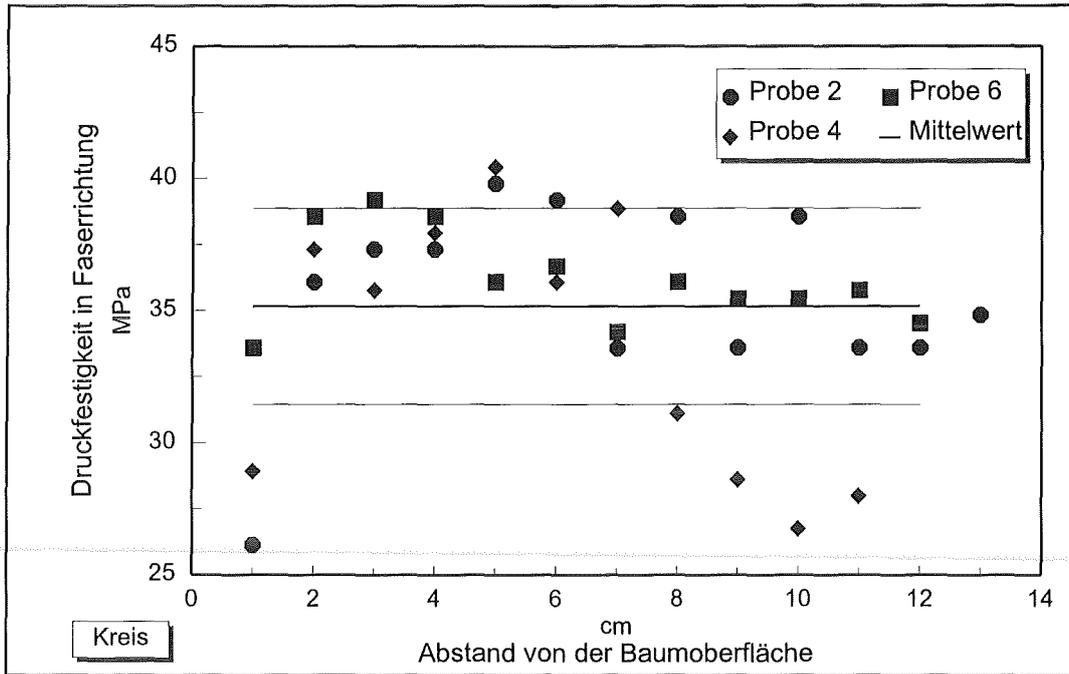


Abbildung 3.8: Vergleichsmessungen der Druckfestigkeiten in Faserrichtung an \varnothing 5 mm-Bohrkernen mit dem Fractometer II bzw. an quaderförmigen Proben (3,15 x 3,9 x 5 mm) aus vertikal untereinander dem Baum entnommenen Radialbohrkernen.

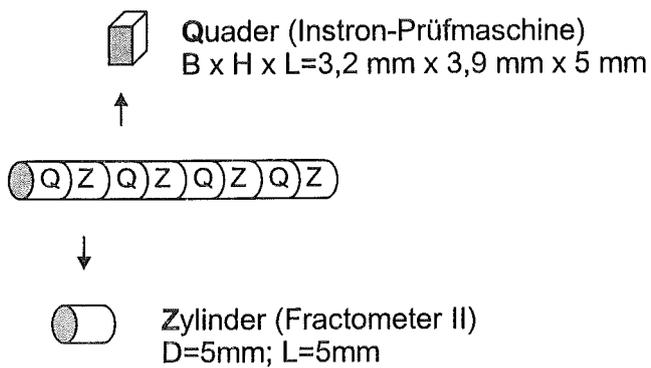


Abbildung 3.9: Anordnung der Probenentnahmestellen bei weiteren Vergleichsmessungen der Druckfestigkeiten in Faserrichtung an \varnothing 5 mm-Bohrkernen mit dem Fractometer II bzw. an quaderförmigen Proben (3,15 x 3,9 x 5 mm) an jeweils einem Radialbohrkern.

Jeder Meßpunkt stellt jeweils den Mittelwert von vier (Instron) bzw. fünf (Fractometer) Einzelmessungen dar, die in unterschiedlichen Höhen aber in gleichem Abstand von der Baumoberfläche gemessen wurden. Bei Versuchsreihe 1 waren die Kurven der Meßwerte entlang des gesamten untersuchten Bereiches nahezu deckungsgleich, ebenso bei Versuchsreihe 2 die ersten 5 cm von der Baumoberfläche nach innen. Im weiteren Verlauf lagen die Meßwerte der 8 mm-Würfel leicht unter denen der 5 mm-Bohrkerne, im Mittel um 6% oder 1,7 MPa.

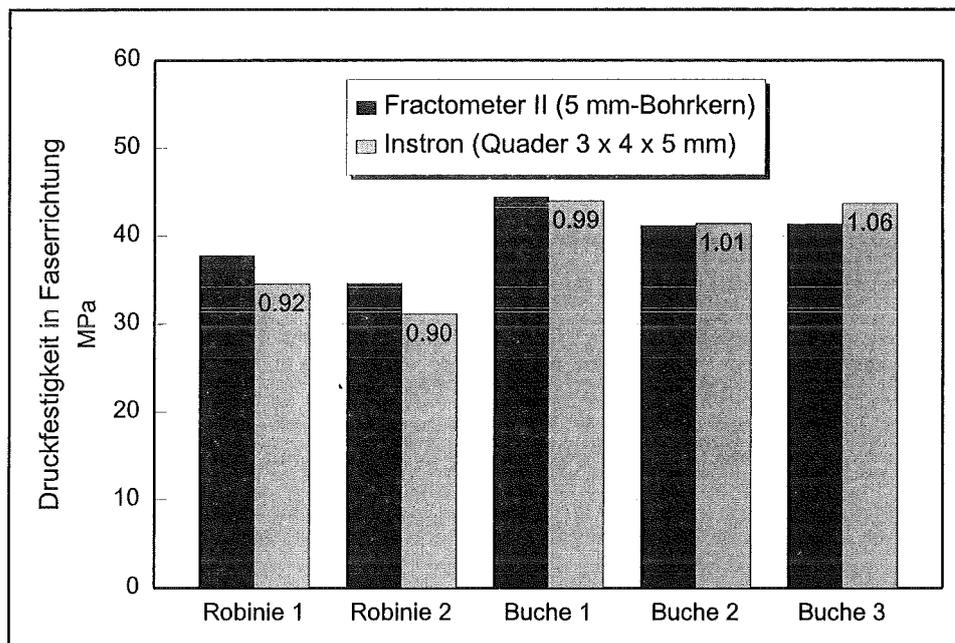


Abbildung 3.10: Mittelwerte der mit dem Fractometer II bzw. mit der Instron-Prüfmaschine abwechselnd erzielten Meßwerte der Druckfestigkeit in Faserrichtung entlang eines Bohrkernes, wobei die eingezeichnete Zahl das Verhältnis der jeweiligen Mittelwerte angibt.

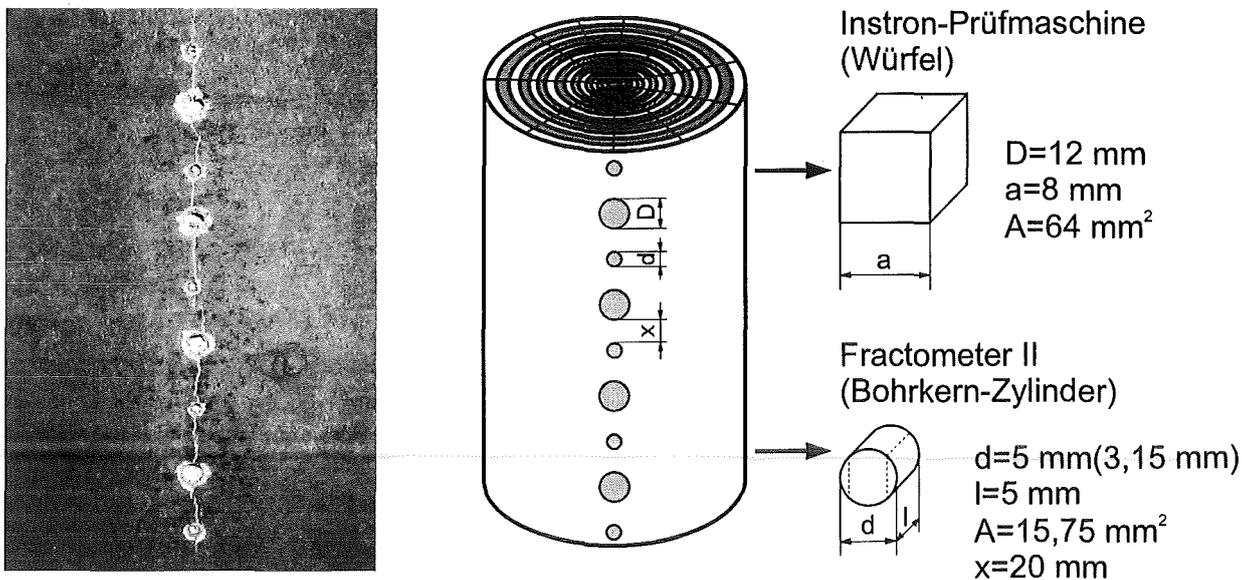


Abbildung 3.11: Probenentnahmestellen und Geometriedaten einer weiteren Vergleichsmessung zur Bestimmung der Druckfestigkeit zwischen Fractometermeßtechnik (zylindrischer Bohrkern) und der Messung mit einer Instron-Prüfmaschine an würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 8 mm.

Diese Ergebnisse ließen nur bei Versuchsreihe 2 auf einen minimalen Größeneffekt schließen, vermutlich wird sich ein Größeneffekt erst mit steigender Probengröße einstellen. Hierbei soll kurz erwähnt werden, daß es mit steigender Probengröße zunehmend schwieriger werden dürfte, fehlerfreie und faserparallele Proben zu finden bzw. herzustellen. Da die Druckfestigkeit in Faserrichtung schon bei geringen Abweichungen der Belastungsrichtung von der Faserrichtung stark abfällt (KOLLMANN, 1982; KNIGGE und SCHULZ, 1966), liegt hier ein deutlicher Nachteil der Normprüfung gegenüber der Fractometer-Meßtechnik.

Zusammenfassend zeigten die verschiedenen Vergleichsmessungen an grünen Holzproben keine entscheidenden Beeinträchtigungen oder Unterschiede bei der Messung der Druckfestigkeit in Faserrichtung mittels der Fractometer-Meßtechnik mit $\varnothing 5\text{ mm}$ -Bohrkernen im Vergleich zu Messungen mittels einer Instron-Prüfmaschine mit quaderförmigen ($3 \times 4 \times 5\text{ mm}$) oder würfelförmigen Proben (8 mm).

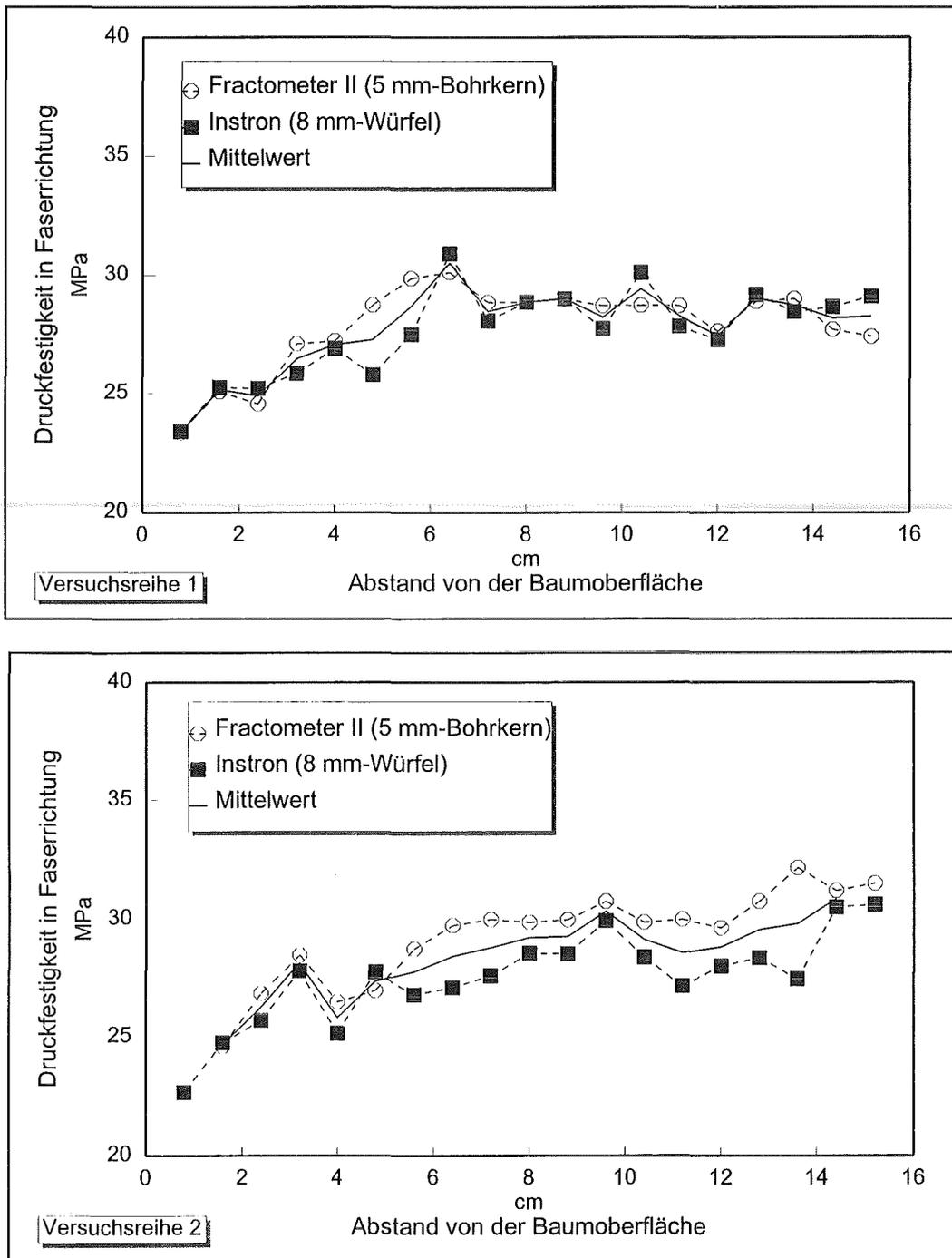


Abbildung 3.12: Mittelwerte der mit dem Fractometer II (5 mm-Bohrkerne) bzw. mit der Instron-Prüfmaschine (8 mm-Würfel) in gleichem Abstand zur Baumoberfläche erzielten Meßwerte der Druckfestigkeit in Faserrichtung von vertikal untereinander entnommenen 5- bzw. 12 mm-Bohrkernen.

3.1.2 Biegefestigkeitsprüfung quer zur Faserrichtung

Die Bedeutung der Querkzugfestigkeiten für den stehenden Baum führte in der Holzforschung sowie bei Baumfachleuten und Sachverständigen bis zur Einführung des Fractometer ein Schattendasein. Das Hauptaugenmerk lag bei der Messung der Druckfestigkeit in Faserrichtung, der Biegefestigkeit in Faserrichtung und der Scherfestigkeit. In den Ländern in denen eine Normvorschrift für die Messung der Querkzugfestigkeit existierte, z.B. in den USA, England, Frankreich und der ehemaligen Tschechoslowakei, wurden ungeeignete Probenformen mit Kerbspannungen im versagensrelevanten Bereich verwendet. In Deutschland existiert überhaupt keine Norm zur Prüfung der Querkzugfestigkeit. Es stellt sich demnach die Frage nach der Rolle der Querkfestigkeit.

Beim Versagen unter Druckbelastung erfolgt nämlich ein Knicken der Fasern nach der Bildung sogenannter slip planes auf mikroskopischer Ebene oft durch tangentielle Trennung des Faserverbundes im Randbereich von Holzstrahl zu umgebenden Längsfasern (siehe Kapitel 2.2.1). Dies geschieht beispielsweise beim normalen Biegebruch eines Baumes, bei dem Faserknicken auf der Druckseite und anschließend Faserzerreißen auf der Zugseite der Biegung als Versagensablauf erfolgt. Die Querkfestigkeit beeinflusst also möglicherweise auch die Druckfestigkeit in gewissem Maße. Eine hohe Querkfestigkeit begünstigt also eine hohe Druckfestigkeit. Die Querkfestigkeit spielt weiter bei jedem gekrümmten Baumteil mit einem sogenannten Unglücksbalken (MATTHECK und BRELOER, 1994) eine entscheidende Rolle, weil sie neben den Wachstumsspannungen die einzige Waffe eines Baumes darstellt, gefährliche Querspannungen in seinem Innern zu bekämpfen.

Im folgenden wird die Messung der Biegebruchfestigkeit quer zur Faserrichtung an 5 mm-Bohrkernen bzw. an dünnen Scheibenproben mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Höhe von 1,7 mm mit der Fractometer-Meßtechnik auf ihre Eignung als Methode zur Festigkeitsbestimmung hin untersucht. Dies geschieht durch Gegenüberstellung der auftretenden Schub- und Biegespannungen unter Biegebelastung von Bohrkern bzw. Scheibenprobe, zu der Vergleichsspannung und den jeweiligen Schub- bzw. Biegefestigkeiten. Weiter werden Vergleichsmessungen der Biegebruchfestigkeit quer zur Faserrichtung an 5 mm-Bohrkernen bzw. an dünnen Scheibenproben mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Höhe von 1,7 mm mit der Fractometer-Meßtechnik durchgeführt, um Aussagen über die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse der unterschiedlichen Probengeometrien treffen zu können.

Zunächst wurden mittels FEM für isotrope und orthotrope Materialeigenschaften die Längsspannungsverteilungen der bereits oben erwähnten Querkzugprobe unter realen Belastungs- und Randbedingungen berechnet. Abbildung 3.13 enthält die für die Finite-Elemente-Rechnungen erforderlichen Daten. Aus Symmetriegründen konnte mit einer Viertelstruktur gerechnet werden. Die berechneten Querkzugspannungen sind in Abbildung 3.14 entlang des Schnitts A-A', also im engsten Querschnitt, für den isotropen und zwei orthotrope ($E_T/E_L=1/20$ bzw. $E_T/E_L=1/10$) Fälle dargestellt. Die Kerbspannungen lagen im isotropen Fall um 110%, im orthotropen Fall um 80% ($E_T/E_L=1/10$) bzw. 40% ($E_T/E_L=1/20$) über der Nennspannung. Im Innern der Probe lagen die Querkzugspannungen zwischen 20 und 60% unter der Nennspannung. Die Messung der Querkzugfestigkeit mit diesen kerbspannungsbehafteten Querkzugproben ist demnach nicht nur wegen der prinzipiell auftretenden Kerbspannungen, sondern auch wegen der Abhängigkeit vom Orthotropieverhältnis bedenklich.

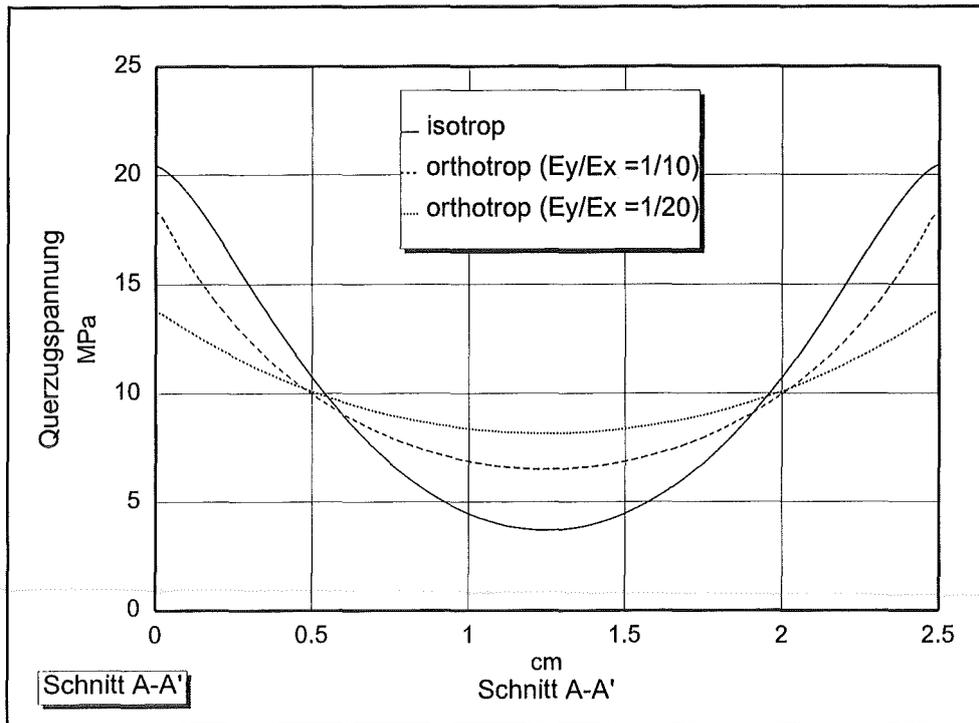


Abbildung 3.14: Verteilung der Querkzugspannungen entlang des engsten Querschnitts (Schnitt A-A') einer Querkzugprobe nach der amerikanischen, britischen und tschechoslowakischen Norm.

	Douglasie	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche
Elastizitätsmodul in Faserrichtung	12000 MPa	10000 MPa	11000 MPa	14000 MPa	13000 MPa
Elastizitätsmodul quer zur Faser (t)	700 MPa	450 MPa	500 MPa	1160 MPa	920 MPa
$E_{\text{quer}}/E_{\text{längs}}$	1/17	1/22	1/22	1/12	1/14

Tabelle 3.2: Elastizitätsmoduli einiger Laub- und Nadelbäume in und quer (tangential) zur Faserrichtung sowie deren Relation zueinander (NIEMZ, 1993).

Die Messung der Biegebruchfestigkeit quer zur Faserrichtung erfolgt beim Fractometer I, II und III an 5 mm-Bohrkernen bzw. beim Fractometer III optional an dünnen Scheibenproben mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Höhe von 1,7 mm. Abbildung 3.15 enthält die Abmessungen der Scheibe bzw. des Bohrkerns mit den jeweiligen Kraftangriffspunkten und Einspannquerschnitten.

Es stellten sich bei der Entwicklung des Fractometer III folgende Fragen:

- Erhält man mit einer 1,7 mm dicken Scheibe sinnvolle Meßwerte, d.h. Versagen infolge Biegebruch und nicht durch Schub?
- Ist die Messung überhaupt praktisch durchführbar und ist die Streuung der Werte noch in akzeptablen Grenzen?
- Sind die erhaltenen Meßwerte mit denen an einem tangentialen Bohrkern gemessenen vergleichbar?

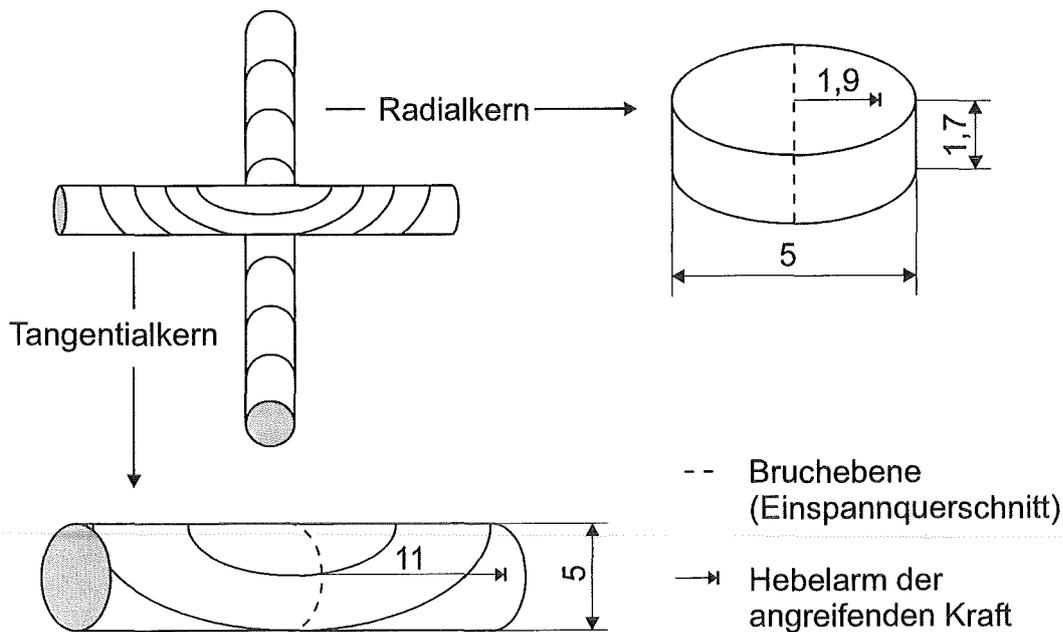


Abbildung 3.15: Abmessungen der Scheibe bzw. des Bohrkerns mit den jeweiligen Kraftangriffspunkten und Einspannquerschnitten für die Messung der tangentialen Biegefestigkeit mit dem Fractometer II bzw. III.

Hierzu wurden die Schubspannungs- und Biegespannungsverteilungen im Einspannquerschnitt von Scheibe und Bohrkern analytisch berechnet und die maximalen Schub- und Biegespannungen den jeweiligen Festigkeiten gegenübergestellt. Die Verteilung der Biegespannungen in Abhängigkeit von der Höhe z berechnet sich folgendermaßen (BEITZ und KÜTTNER, 1987):

$$\sigma_B = \frac{Mz}{I} = \frac{Flz}{I},$$

d.h. es gilt jeweils für einen

Kreisquerschnitt (Bohrkern):

$$\sigma_B = \frac{Flz}{\pi d^4/64} \text{ bzw. } \sigma_{B\max}(z = d/2) = \frac{32Fl}{\pi d^3},$$

Rechteckquerschnitt (Scheibe):

$$\sigma_B = \frac{Flz}{h^3b/12} \text{ bzw. } \sigma_{B\max}(h/2) = \frac{6Fl}{bh^2},$$

wobei

M =Biegemoment

F =Kraft

I =Flächenträgheitsmoment

h =Höhe der Scheibe

z =Laufvariable für Höhe

l =Hebelarm

d =Querschnittsdurchmesser

b =Breite der Scheibe

Die Verteilung der Schubspannungen in Abhängigkeit von der Höhe z berechnet sich folgendermaßen (BEITZ und KÜTTNER, 1987):

$$\tau_{xz} = \frac{F_Q}{I_y b(z)} \int_{\zeta=z}^{e_1} \zeta dA = \frac{F_Q S_y(z)}{I_y b(z)},$$

$$\text{mit } S_y(z) = \int_z^{e_1} \zeta dA = \int_z^{e_1} \zeta b(\zeta) d\zeta$$

d.h. die Schubspannungsverteilung berechnet sich für einen Rechteckquerschnitt bzw. Kreisquerschnitt wie folgt:

Rechteckquerschnitt:

$$S_y(z) = \int_z^{h/2} \zeta b d\zeta = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) = \frac{bh^2}{8} \left[1 - \left(\frac{z}{h/2} \right)^2 \right],$$

$$\text{und damit ist } \tau_{xz} = \frac{3 F_Q}{2 bh} \left[1 - \left(\frac{z}{h/2} \right)^2 \right].$$

Die maximale Schubspannung befindet sich in der Mitte ($z=0$) und nach Voraussetzung sind die Schubspannungen über der Breite konstant:

$$\max \tau_{xz} = \tau_{xz}(z=0) = \frac{3 F_Q}{2 bh}.$$

In Wirklichkeit sind diese jedoch infolge der Querdehnung über der Breite nicht konstant, sondern am Rand des Querschnitts etwas höher und in der Mitte etwas niedriger, so daß für die maximale Randschubspannung gilt:

$$\max \tau_{xz}^{\text{Rand}} = \tau_{xz}^{\text{Rand}}(z=0) = f \frac{3 F_Q}{2 bh}, \text{ mit } f = 1,7$$

Kreisquerschnitt:

$$S_y(z) = \frac{2}{3} r^3 \cos^3 \psi,$$

$$\text{und damit ist } \tau_{xz} = \frac{F_Q}{\left(\frac{\pi r^4}{4} \right) 2r \cos \psi} \frac{2}{3} r^3 \cos^3 \psi = \frac{4 F_Q \cos^2 \psi}{3 \pi r^2} = \frac{4 F_Q}{3 \pi r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{r} \right)^2 \right].$$

Die maximale Schubspannung befindet sich auch beim Kreisquerschnitt in der Mitte ($z=0$):

$$\max \tau_{xz}(z=0) = \frac{4}{3} \frac{F_Q}{\pi r^2},$$

wobei

F_Q =Querkraft

h =Höhe der Scheibe

z =Laufvariable für Höhe

I =Flächenträgheitsmoment

r =Radius

b =Breite der Scheibe

S_y =Statisches Moment

y =Laufvariable für Breite

f =Geometriefaktor

e_1 =maximale Höhe ab $z=0$

Aufgrund der vorliegenden, überlagerten Beanspruchung infolge Biegung und Schub bei der Scheibe bzw. beim Bohrkern kann man die Beanspruchungsarten einzeln oder bei Vergleich mit einem Materialkennwert mittels einer Vergleichsspannung bewerten. Im folgenden werden jedoch die einzelnen Spannungen (Biegung bzw. Schub) und Festigkeiten (Biegung bzw. Schub) direkt miteinander verglichen.

In Abbildung 3.16 sind jeweils für die Scheiben- bzw. Bohrkerngeometrie die auftretenden Biege- und Schubspannungen in MPa bei einer fiktiv angenommenen Kraft $F=10$ N über der Höhe z aufgetragen. Beim zylindrischen Bohrkern und bei der Scheibe fällt die Biegespannung linear von ihrem Maximalwert bei $z = d/2$ auf null bei $z = 0$, die Schubspannung hingegen steigt von null bei $z = d/2$ auf ihren Maximalwert bei $z = 0$. Beim Bohrkern ist die Biegespannung bis auf einen minimalen Bereich in der Bohrkernmitte höher als die Schubspannung. Die Schubspannung kann hier also vernachlässigt werden.

Bei der Scheibe sind die Verläufe von Biege- und Schubspannung ähnlich wie beim Bohrkern. Zur Mitte hin sind die Biegespannungen bis auf einen kleinen Bereich (ca. ein Viertel des Abstandes von außen) höher als die Schubspannung. Diese kann demnach auch hier vernachlässigt werden. Da die tangentielle Biegefestigkeit und die Schubfestigkeit τ_{tr} (longitudinal-radial Ebene, Kraftrichtung in radialer Richtung) ungefähr von der gleichen Größe sind, spielen die Schubspannungen für das Versagen und damit für die Prüfung der tangentialen Biegefestigkeit mittels eines Bohrkernes bzw. einer Scheibenprobe keine Rolle. Die angreifende Kraft geht bei der Berechnung von Biege- und Schubspannung einfach ein, so daß das Verhältnis der Spannungen konstant bleibt. Die tangentielle Biegefestigkeit und die Schubfestigkeit τ_{tr} betragen bei Laub- bzw. Nadelbäumen im Mittel zwischen 5 und 12 MPa, wodurch direkt aus den Diagrammen ersichtlich ist, daß die tangentielle Biegefestigkeit zuerst erreicht wird und es zum Biegeversagen kommt. Dieses Ergebnis wird ebenfalls erzielt, wenn man die maximale Schubspannung am Rand bei $z = 0$ (z.B. für $F = 10$ N beträgt $\tau = 3$ MPa) der maximalen Biegespannung (z.B. für $F = 10$ N beträgt $\sigma = 7,9$ MPa) gegenüberstellt. Die maximale Biegespannung beträgt dann immerhin noch das 2,6fache der maximalen Schubspannung. Diese Ergebnisse bestätigen sich in der Praxis bei Beobachtung des Versagensvorganges, der immer durch Biegebruch eingeleitet wird.

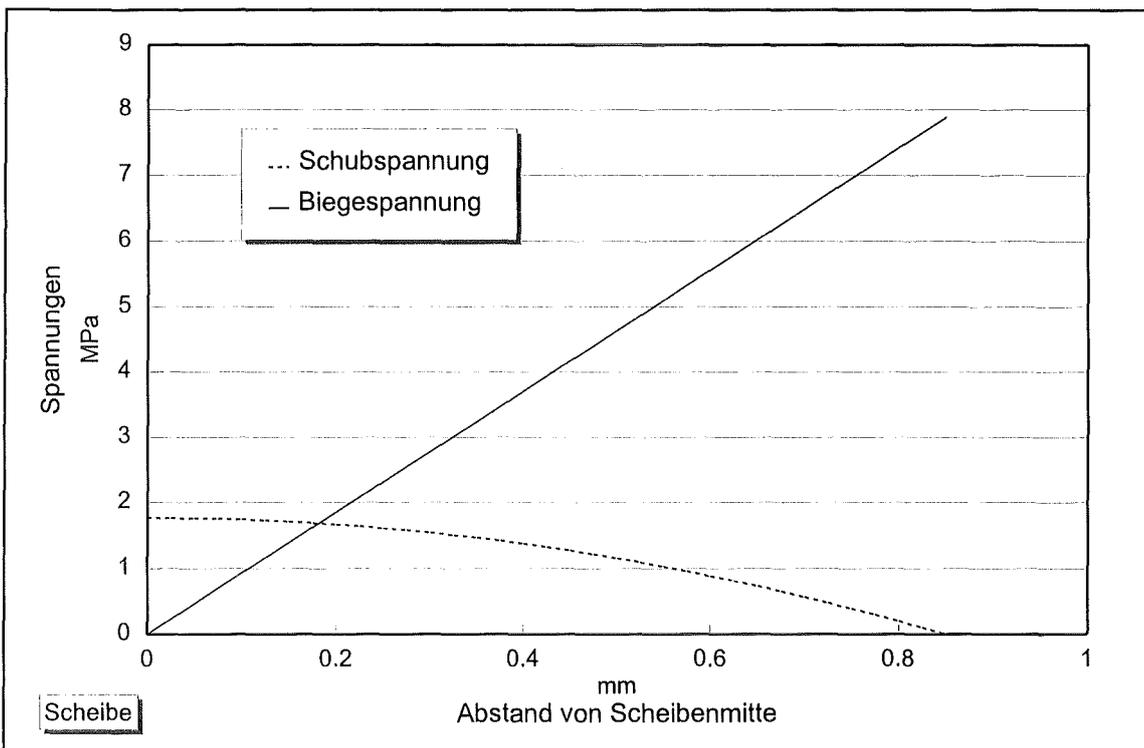
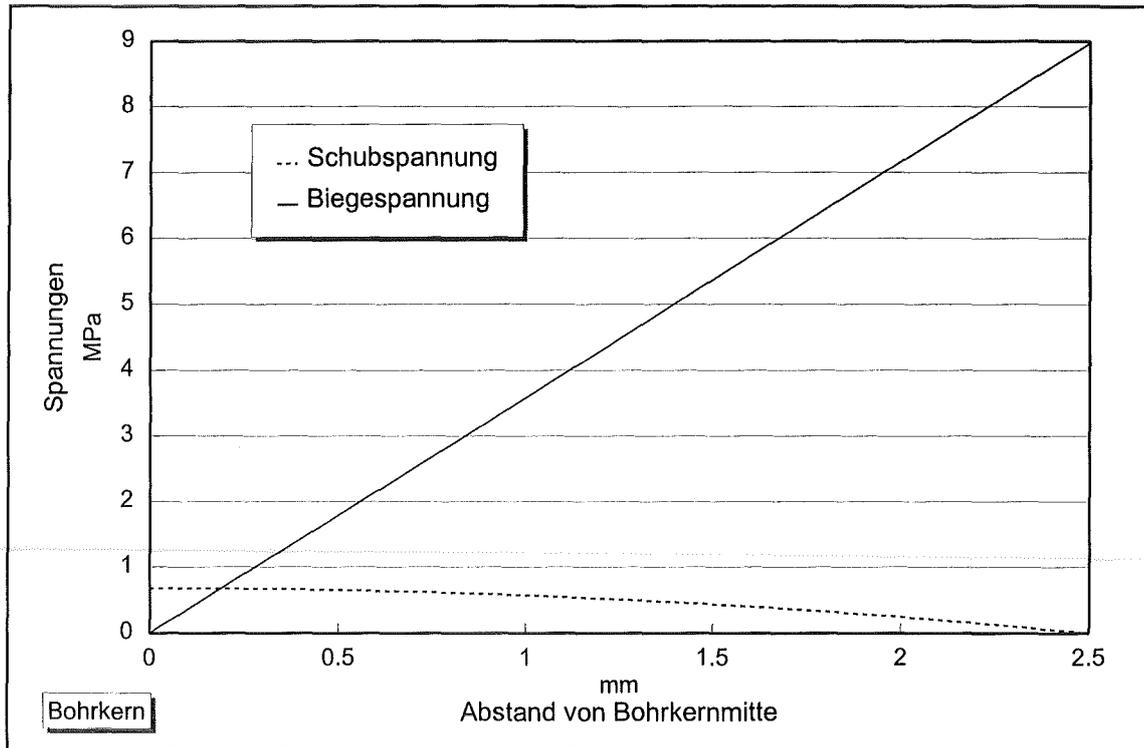


Abbildung 3.16: Verläufe der Biege- und Schubspannung in MPa bei einer fiktiv angenommenen Kraft $F = 10 \text{ N}$ jeweils über der Höhe z aufgetragen bei der Scheiben- bzw. Bohrkerntzgeometrie.

Zur Überprüfung der praktischen Durchführbarkeit und Vergleichbarkeit der Messung der tangentialen Biegefestigkeit mit einer Scheibe wurden Vergleichsmessungen an grünen Holzproben durchgeführt. Entsprechend Abbildung 3.15 wurden je ein radialer bzw. tangentialer Bohrkern in unmittelbarer Nachbarschaft einem Baum entnommen. Gemessen wurden die Biegefestigkeiten je an den Scheibenproben mit einer Instron-Prüfmaschine analog den Abmessungen beim Fractometer III und an den tangentialen Bohrkernen am Tangentialpunkt¹². Die Meßstellen lagen bei je einem geprüften Paar (Radial- bzw. Tangentialkern) direkt übereinander. Abbildung 3.17 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsmessungen. Die Zahlenangaben geben das Verhältnis der Mittelwerte der gemessenen tangentialen Biegefestigkeiten von Instron-Prüfmaschine (Scheibe aus radialem Bohrkern) zu Fractometer III (tangentialer Bohrkern) pro Bohrkernpaar an. Bei Buche 1 lagen die Biegefestigkeiten der Scheibenproben etwas über denen der Bohrkern und bei Buche 2 war das Verhältnis umgekehrt, wobei die Abweichungen gering waren. Die untersuchte Esche lieferte ein völlig anderes Bild. Hier lagen die mit dem Fractometer an \varnothing 5 mm-Bohrkernen gemessenen, tangentialen Biegefestigkeiten deutlich über denen mit der Instron an Scheibenproben gemessenen.

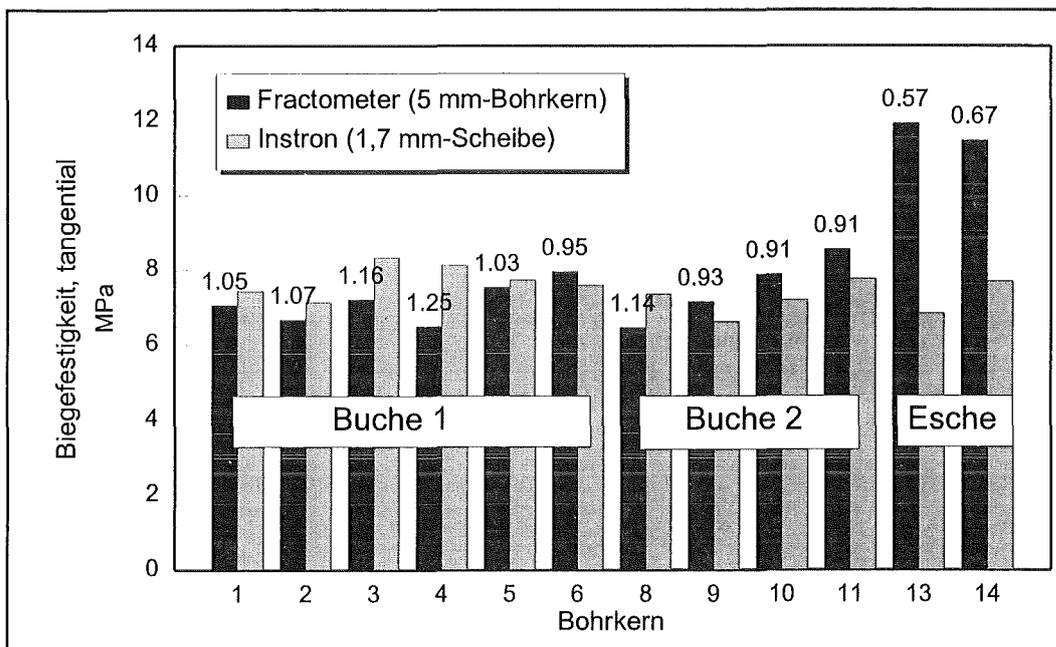


Abbildung 3.17: Meßwerte der tangentialen Biegefestigkeiten von Instron-Prüfmaschine (Scheibe aus radialem Bohrkern) und Fractometer III (tangentialer Bohrkern) pro Bohrkernpaar, die Zahlenangaben geben das Verhältnis der Mittelwerte an.

¹² Unter dem Tangentialpunkt versteht man die Stelle eines Tangentialkernes, an dem die Holzstrahlen genau senkrecht und die Jahresringe parallel zur Kernachse angeordnet sind. Bei einem radial entnommenen Kern ist die Anordnung umgekehrt.

Der Grund für diese Unterschiede dürfte in dem ringporigen Aufbau von Esche liegen. Die Scheibendicke kann durchaus komplett im Bereich des Frühholzes liegen, dessen tangentialen Festigkeitswerte um bis zur Hälfte niedriger sein können wie die des Spätholzes (GUTMANN, 1995). Der Bruch im Frühholz erfolgt dabei aufgrund der dünnen Zellwände intrazellulär und vollzieht sich eher langsam und gestaffelt. Im Spätholz erfolgt der Bruch interzellulär und vollzieht sich eher spontan und spröde. Beim Bohrkern hingegen beinhaltet die Bruchfläche Früh- und Spätholzanteile. Die Scheibenprobe ermöglicht also eine feinere Auflösung der Festigkeitsverteilung. Bei ringporigen Laubbäumen und bei Nadelbäumen ist deshalb bei der Messung besonders auf den Ort des Bruches zu achten.

3.2 Festigkeitsrelationen und Festigkeitsverteilungen in geraden und fehlerfreien Bäumen

Eine Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war herauszufinden, ob im grünen Baum feste Relationen zwischen verschiedenen Festigkeitskenngrößen existieren. Es stellte sich ebenso die Frage nach der Verteilung der Festigkeiten, die von den größten biologischen Lastträgern der Erde im Laufe der Evolution gefunden wurde, um dem mechanischen Versagen zu widerstehen. Welche Möglichkeiten haben oder benutzen Bäume, um auf sich ändernde, mechanische Umgebungsbedingungen zu reagieren bzw. können sie überhaupt darauf reagieren? Weitere Fragen stellen sich nach Unterschieden oder Gemeinsamkeiten zwischen den verschiedenen Baumarten und danach, ob man bei anatomisch ähnlichen Baumarten auch auf ähnliche Festigkeitskenngrößen schließen kann. Hierzu wurde zunächst eine Feldstudie an über 50 heimischen Laub- und Nadelbäumen und an vier Eukalyptusbäumen auf Tasmanien (Australien) durchgeführt, die sämtlich keine Anzeichen einer Schädigung aufwiesen und gerade Stämme hatten. Ziel war es hierbei zuerst Aussagen über den Normalzustand treffen zu können, ehe Bäume mit Abweichungen von der Normalgestalt untersucht wurden (ZIPSE et al., 1995). Abbildung 3.18 zeigt die Orte der Probenentnahme. Es wurden je Baum fünf Bohrkernproben entnommen, daß man in drei verschiedenen Höhen und Richtungen zu Meßwerten gelangte.

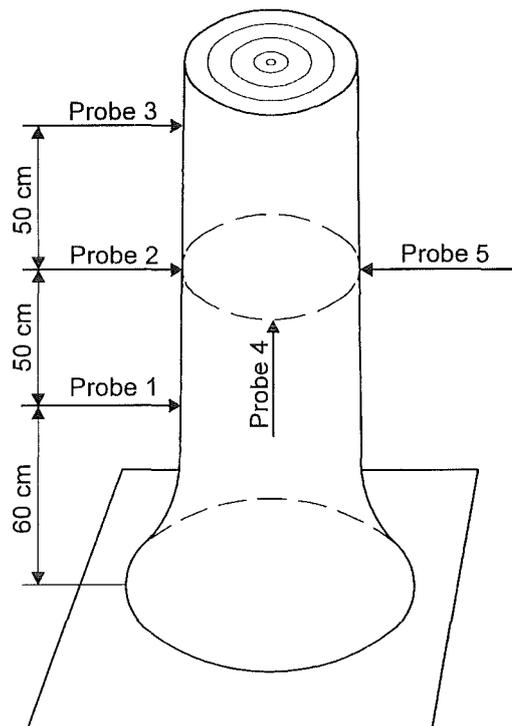


Abbildung 3.18: Bohrkernentnahmestellen an einem Baumstamm im Rahmen der Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Laub- und Nadelbäumen.

Die Bohrkernproben wurden anschließend mit dem Fractometer in saftfrischem Zustand geprüft, so daß Festigkeitskenngrößen für grünes Holz ermittelt wurden. Die gemessenen Festigkeitskenngrößen waren die Druckfestigkeit in Faserrichtung und die radiale Biegefestigkeit. Die Messung der tangentialen Biegefestigkeit erfolgte nicht an allen untersuchten Bäumen. Die Meßwerte der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in

Faserrichtung wurden dabei fast an derselben Stelle ermittelt, wodurch erstmals lokale Festigkeitsrelationen im Baum bestimmt und dargestellt werden konnten. Die Messung der tangentialen Biegefestigkeit wurde an tangential entnommenen Bohrkernen (Tangentialkernen) am Tangentialpunkt geprüft. Pro Baum wurden die erhaltenen Meßwerte zu den Mittelwerten der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung in Beziehung gesetzt, diese Relationen besitzen also eigentlich einen weniger lokalen Charakter. Es wurde festgestellt, daß sich die Verhältnisse kaum unterscheiden, wenn man zum einen die lokalen Verhältnisse bildet und dann den Mittelwert berechnet oder zum anderen zuerst die Mittelwerte berechnet und danach das Verhältnis bildet. Deshalb können die Mittelwerte der tangentialen Biegefestigkeiten ebenso wie die Mittelwerte der Druckfestigkeit in Faserrichtung oder der radialen Biegefestigkeit behandelt und untereinander in Beziehung gesetzt werden.

In Abbildung 3.19 sind jeweils getrennt für Laub- und Nadelbäume alle erzielten Meßwerte der radialen Biegefestigkeit über der jeweils nahezu am selben Ort gemessenen Druckfestigkeit in Faserrichtung aufgetragen. Das Bestimmtheitsmaß r^2 betrug bei den Nadelbäumen 0,06, es lag demnach keine Korrelation vor. Bei den Laubbäumen wurde ein $r^2 = 0,6$ berechnet, d.h. zwischen der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung liegt eine Korrelation vor. Das Bestimmtheitsmaß r^2 wurde mit Hilfe einer Regressionsanalyse in LOTUS 123 Version 4.0 ermittelt. Bei den Nadelbäumen lagen der Untersuchung 746 Beobachtungen (1492 Meßwerte) zugrunde, bei den Laubbäumen waren es 1276 Beobachtungen (2552 Meßwerte). Die Steigung der Regressionsgeraden betrug 0,45. Die Mittelwerte der radialen Biegefestigkeiten und der Druckfestigkeiten in Faserrichtung jeweils eines Baumes sind für alle Laub- bzw. Nadelbäume in Abbildung 3.20 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß r^2 betrug bei den Nadelbäumen 0,12, es lag demnach keine Korrelation vor. Bei den Laubbäumen wurde ein $r^2 = 0,7$ berechnet, d.h. zwischen der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung lag eine Korrelation vor. Hier wurde geprüft, ob tatsächlich eine von null verschiedene Korrelation vorlag oder nicht, d.h. ob der beobachtete Wert r signifikant oder rein zufällig von null verschieden war (WEBER, 1992; BRONSTEIN und SEMENDJAJEW, 1983). Es wurde auf einem Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ die Hypothese $H_0: \rho \leq 0$ gegen die Alternative $H_1: \rho > 0$ geprüft.

Der kritische Bereich K lautete:

$$|t| = |r| \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} > t_{n-2;0,95}$$

Für Laubbäume ($n = 28$) ergab sich $t_{26;0,95} = 1,706$, der Prüfwert betrug $t = 7,7$ und lag damit im kritischen Bereich. Die Nullhypothese wurde damit zugunsten der Alternative verworfen, d.h. es bestand ein gleichsinniger Zusammenhang zwischen den Mittelwerten der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung je Baum bei Laubbäumen. Für Nadelbäume ($n = 20$) ergab sich $t_{18;0,95} = 1,734$, der Prüfwert betrug $t = 1,583$ und lag damit nicht im kritischen Bereich. Die Nullhypothese wurde damit nicht zugunsten der Alternative verworfen, d.h. es bestand kein gleichsinniger Zusammenhang zwischen den Mittelwerten der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung je Baum bei Nadelbäumen.

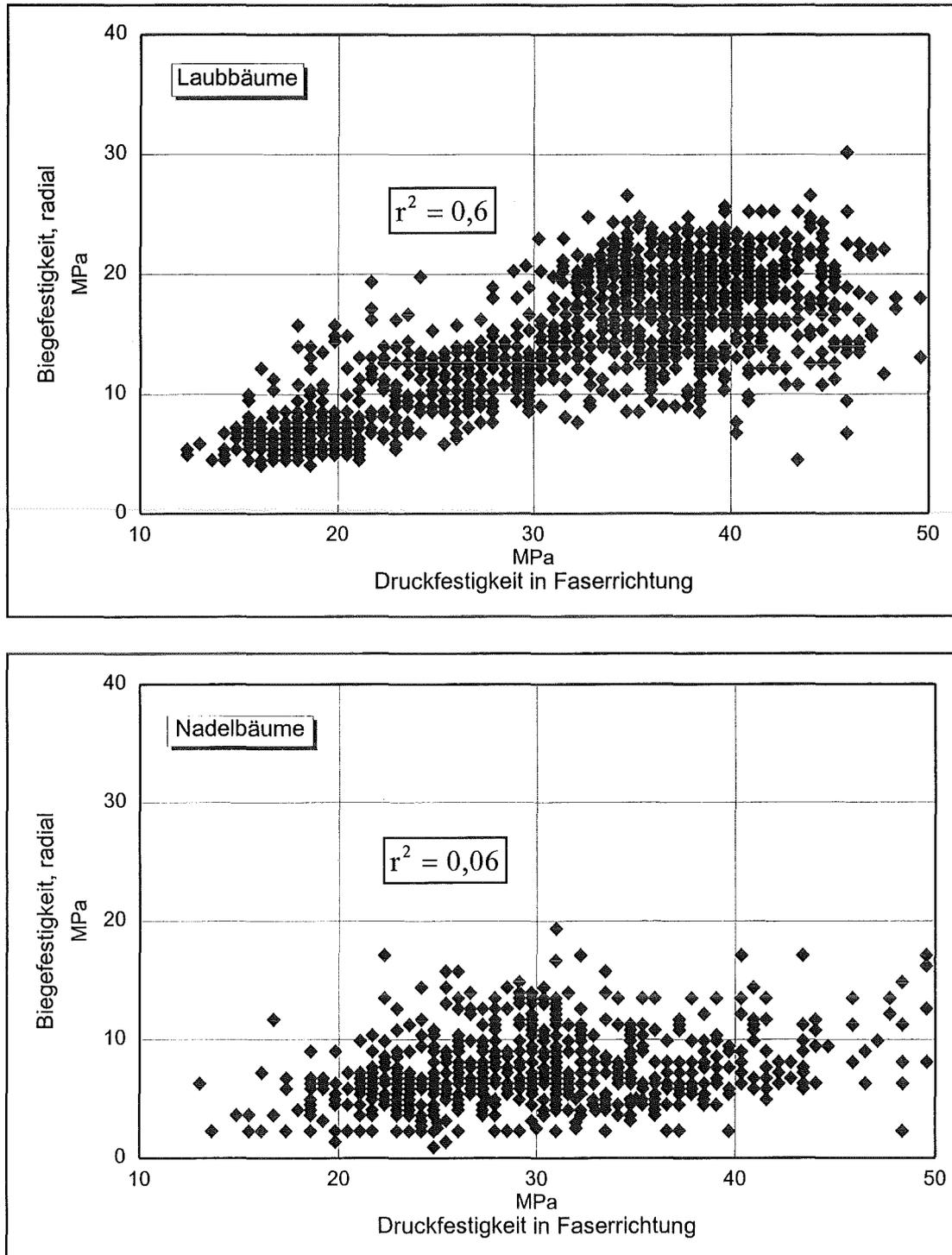


Abbildung 3.19: Meßwerte der radialen Biegefestigkeit, aufgetragen über der jeweils nahezu am selben Ort gemessenen Druckfestigkeit in Faserrichtung aller untersuchten Laub- und Nadelbäume bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen.

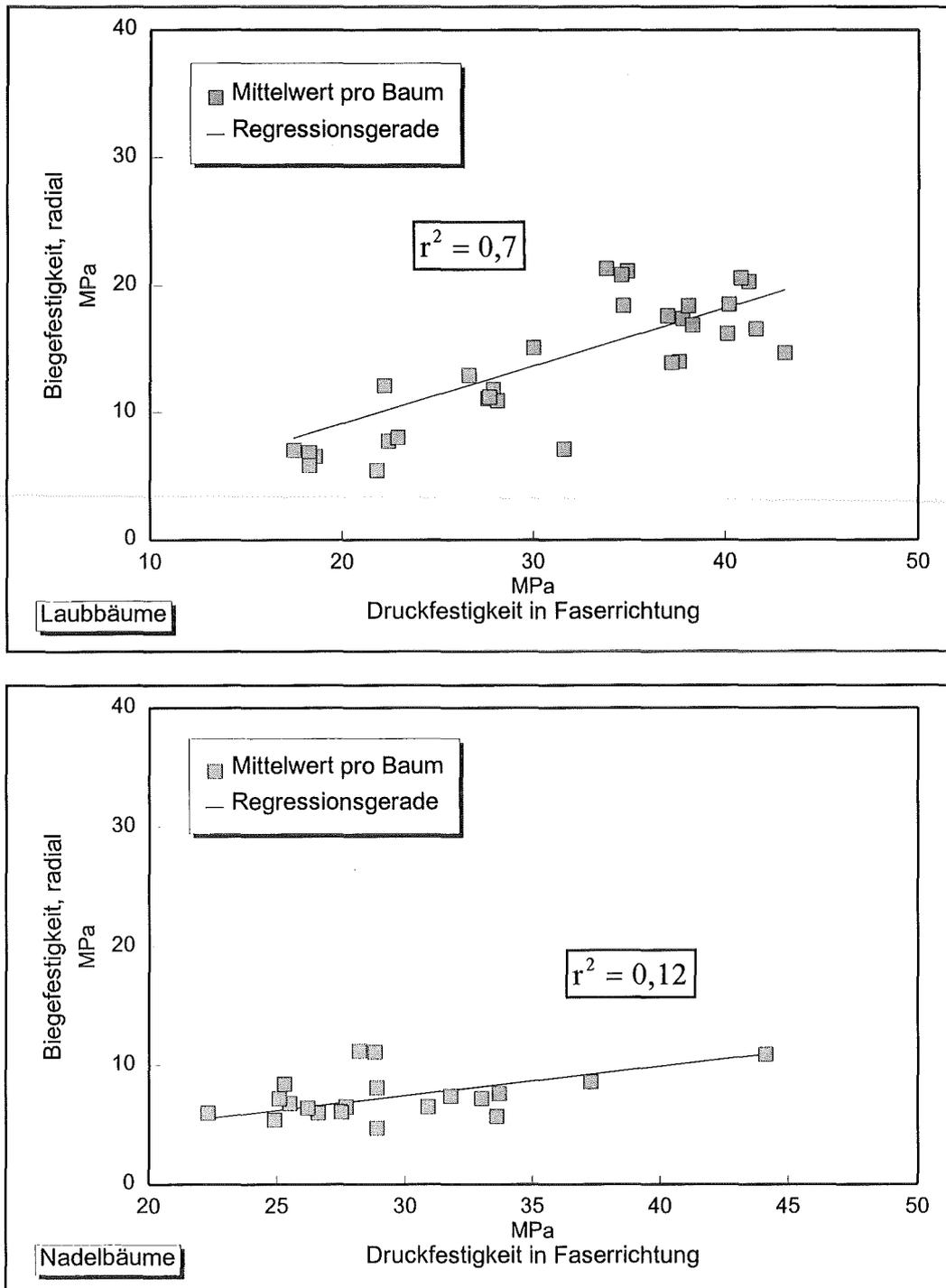


Abbildung 3.20: Mittelwerte der radialen Biegefestigkeiten, dargestellt über den Mittelwerten der Druckfestigkeit in Faserrichtung jeweils eines Baumes aller untersuchten Laub- und Nadelbäume bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen.

In den Abbildungen 3.21 bis 3.23 sind die Ergebnisse der Feldstudie für jede Baumart einzeln in einem xy-Diagramm dargestellt. Die gemessenen Druckfestigkeiten in Faserrichtung wurden jeweils mit Literaturwerten (Mittelwert und Standardabweichung) grünen Holzes aus LAVERS (1983), bei Robinie aus U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987) und schließlich bei

Eukalyptus mit Angaben aus WAGENFÜHR und SCHEIBER (1989) verglichen. In den Diagrammen entspricht die mittlere, senkrechte Linie dem jeweiligen Mittelwert, die beiden äußeren Linien den Standardabweichungen. Die gemessenen radialen Biegefestigkeiten wurden wegen der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Problematik der in der Literatur verwendeten Querszugproben nicht mit denselben verglichen. Die Ergebnisse für die Druckfestigkeiten stimmten für die weicheren Hölzer gut überein. Für die steiferen Hölzer mit kleiner Bruchdehnung läßt sich die Abweichung evtl. aus dem Zwischentrocknungsverhalten der Großproben mit der Unvermeidbarkeit von Trocknungsrissen erklären. Unterschiedliche Standorte, Feuchtegehalte, Belastungsgeschwindigkeiten, evtl. schräge Faserverläufe bei den Großproben sowie möglicherweise verschiedene Varietäten der einzelnen Gattungen sind Faktoren die einen Vergleich zusätzlich erschweren.

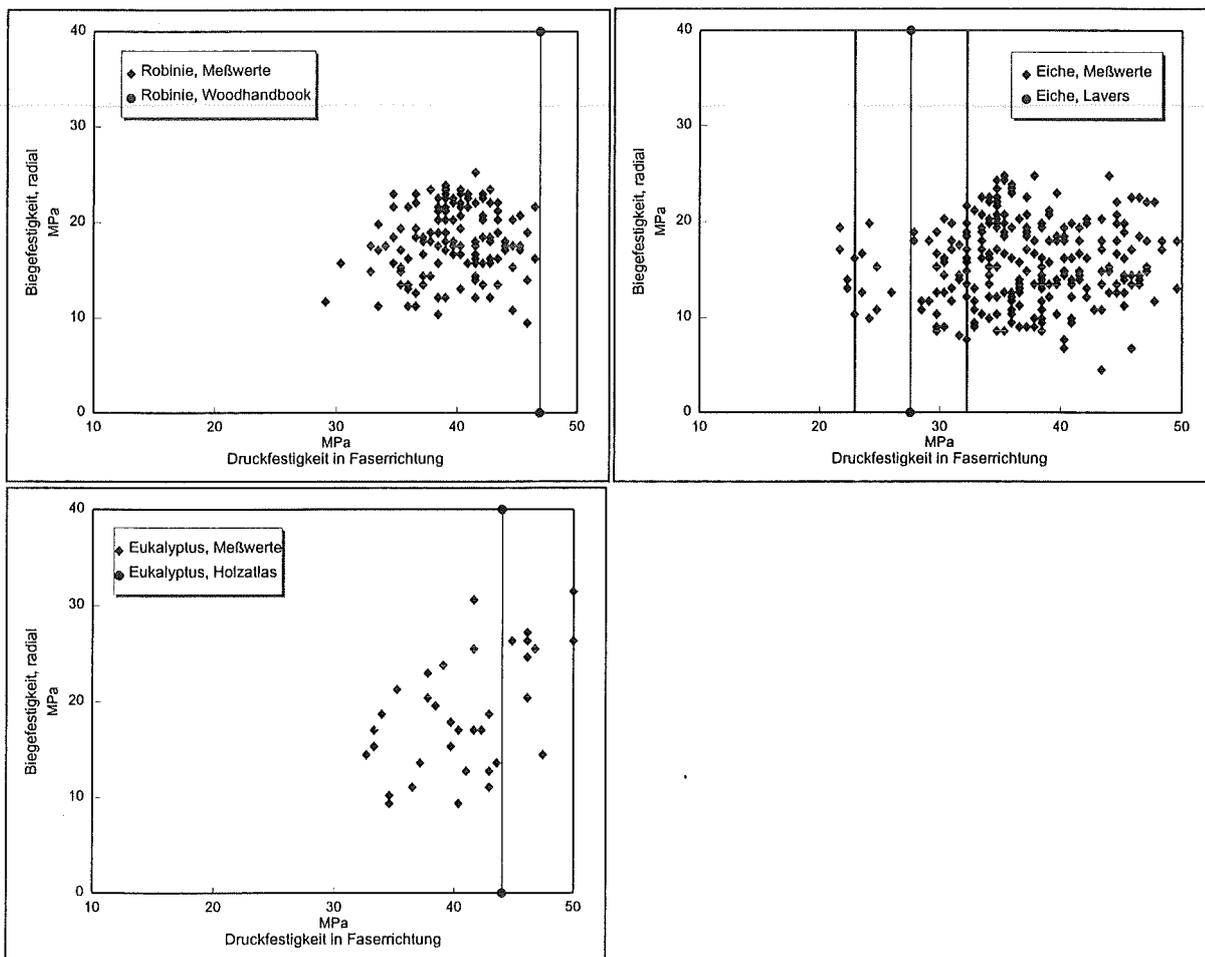


Abbildung 3.21: Meßwerte der radialen Biegefestigkeit, aufgetragen über der jeweils fast am selben Ort gemessenen Druckfestigkeit in Faserrichtung für ringporige Laubbäume (Robinie, Eiche) und Eukalyptus im Vergleich mit Literaturwerten der Druckfestigkeit in Faserrichtung (LAVERS, 1983; WAGENFÜHR und SCHEIBER, 1989; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987). Die mittlere Linie entspricht dem jeweiligen Mittelwert, die beiden äußeren Linien stellen die dazugehörige Standardabweichung dar.

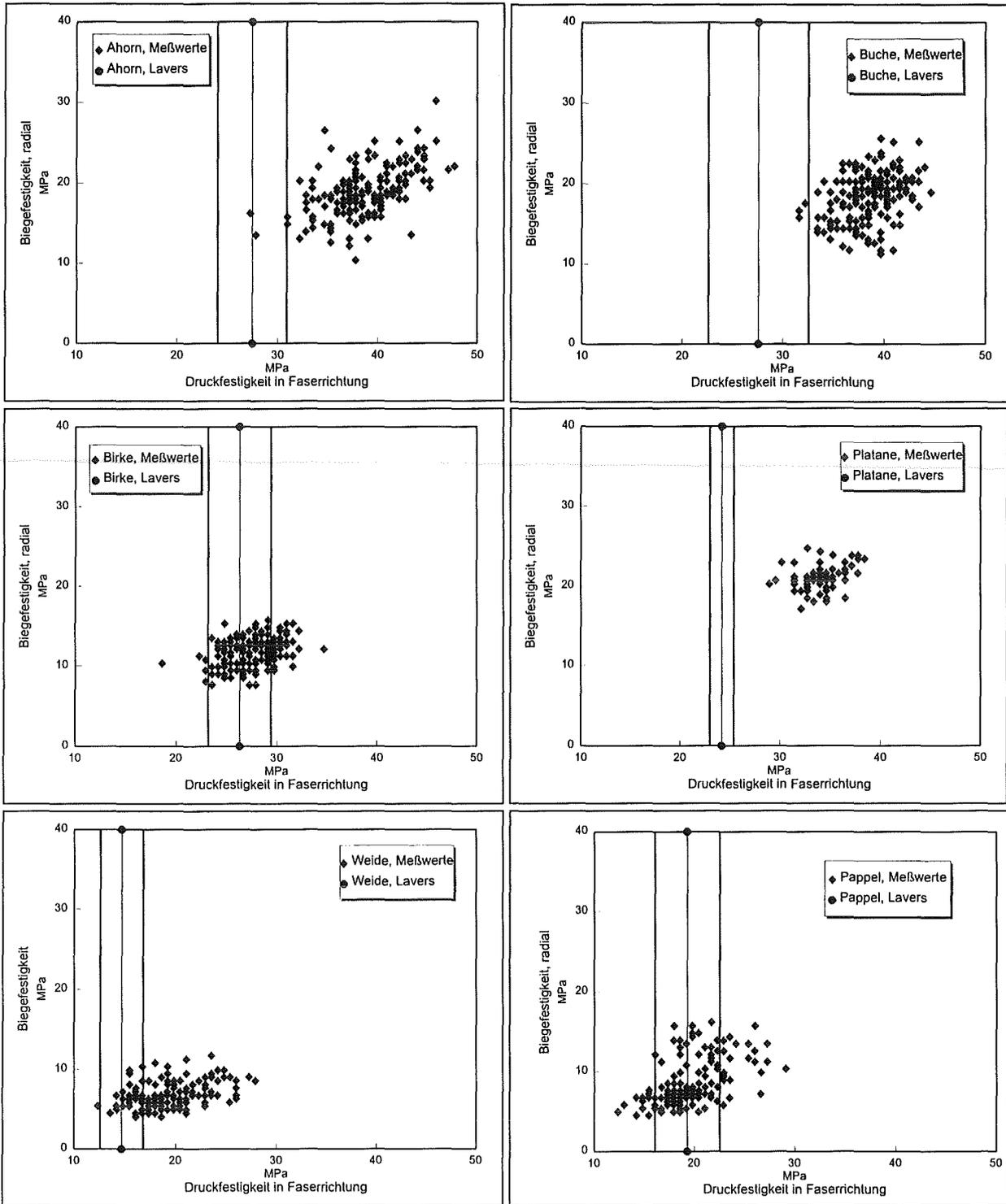


Abbildung 3.22: Meßwerte der radialen Biegefestigkeit, dargestellt über der jeweils fast am selben Ort gemessenen Druckfestigkeit in Faserrichtung für zerstreuporige Laubbäume im Vergleich mit Literaturwerten der Druckfestigkeit in Faserrichtung (LAVERS, 1983). Die mittlere Linie entspricht dem jeweiligen Mittelwert, die beiden äußeren Linien stellen die dazugehörige Standardabweichung dar.

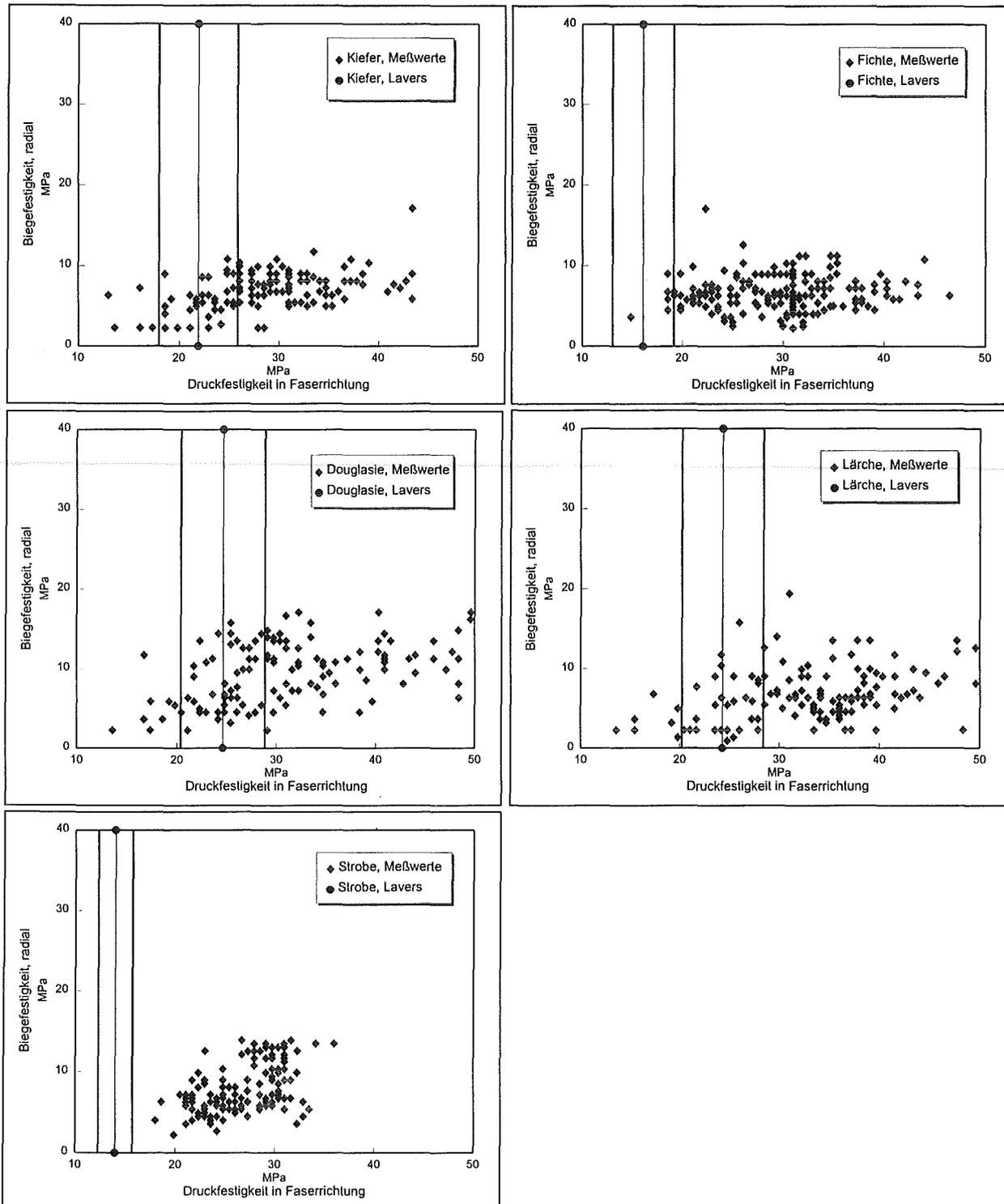


Abbildung 3.23: Meßwerte der radialen Biegefestigkeit, aufgetragen über der jeweils fast am selben Ort gemessenen Druckfestigkeit in Faserrichtung für Nadelbäume im Vergleich mit Literaturwerten der Druckfestigkeit in Faserrichtung (LAVERS, 1983). Die mittlere Linie entspricht dem jeweiligen Mittelwert, die beiden äußeren Linien stellen die dazugehörige Standardabweichung dar.

Die mit dem Fractometer gemessenen Druckfestigkeiten in Faserrichtung streuten bei den Nadelbäumen und den ringporigen Laubbäumen (Eiche, Robinie) deutlich stärker als bei den zerstreutporigen Laubbäumen. Dies traf auch für die mit dem Fractometer gemessenen radialen Biegefestigkeiten zu. Bei den Nadelbäumen und den ringporigen Laubbäumen führt das dort vorhandene, weniger feste Frühholz (bei zerstreutporigen Laubbäumen ist der Unterschied zwischen Früh- und Spätholz gering) zu einer Abhängigkeit vom jeweiligen Anteil an der Prüffläche (z. B. beim Druckversuch) und damit zu größeren Streuungen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen je gemessener Festigkeitskenngröße sowie die Relationen zwischen diesen sind für Laubbäume in Tabelle 3.3 und für Nadelbäume in Tabelle 3.4 jeweils pro Baum aufgelistet. Die bei den hellgrau unterlegten Feldern zugrundeliegenden Meßwerte der tangentialen Biegefestigkeiten wurden nicht in Marknähe gemessen, während die nicht unterlegten Meßwerte der tangentialen Biegefestigkeiten in Marknähe gemessen wurden. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Festigkeitskenngrößen sind in MPa angegeben.

	Druckfestigkeit longitudinal		Biegefestigkeit radial		rad. Biegef. / long. Druckf. Mittelwert	Biegefestigkeit tangential		tan. Biegef. / long. Druckf. Mittelwert	tan. Biegef. / rad. Biegef. Mittelwert
	Mittelwert	Stdabw.	Mittelwert	Stdabw.		Mittelwert	Stdabw.		
Ahorn 1	41.2	2.9	20.3	3.2	0.49	9.9		0.24	0.49
Ahorn 2	34.7	4.3	18.4	3.4	0.51	7.3	1.7	0.21	0.4
Ahorn 3	37.8	2.8	17.4	1.4	0.45	9.3	0.4	0.25	0.53
Birke 1	27.6	2.4	11.1	2.1	0.4	5.6		0.2	0.5
Birke 2	26.6	2.9	12.9	1.6	0.48	6.1		0.23	0.47
Birke 3	27.9	2.4	11.8	1.3	0.42				
Buche 1	40.2	1.8	18.5	3.8	0.46				
Buche 2	38.1	2.2	18.4	2.9	0.48	9	1.3	0.24	0.49
Buche 3	37	2.7	17.6	2.5	0.48				
Edelkastanie	31.6	3.1	7.1	1.9	0.23	7.2	1.2	0.23	1.01
Eiche 1	30	4	15.1	3.2	0.51				
Eiche 2	37.6	3.1	14	3.5	0.38	11.1	0.4	0.3	0.79
Eiche 3	37.2	4.6	13.9	3.9	0.37	11.3	0.8	0.3	0.81
Eiche 4	43.1	4.1	14.7	4.2	0.34				
Eiche 5	41.6	4.9	16.6	3.8	0.4				
Eiche 6	34.9	1.6	21.1	2.1	0.61	9.72	0.9	0.31	0.46
Esche 1	28.1	3.3	10.9	2.3	0.4	8.55	1.1	0.32	0.67
Esche 2	27.7	3.4	11.2	2	0.42	8.3	1.4	0.32	0.68
Pappel 1	22.2	2.8	12.1	2.2	0.57				
Pappel 2	18.6	2.1	6.5	0.9	0.36				
Pappel 3	21.8	3.5	5.4	1.2	0.25	4.3	0.6	0.2	0.8
Pappel 4	22.4	2.3	7.7	0.5	0.35	4.6	0.7	0.21	0.6
Pappel 5	17.5	2.2	7	1.4	0.4	3.4		0.19	0.49
Platane 1	33.8	2.2	21.3	1.5	0.63	5.8	0.5	0.17	0.27
Platane 2	34.6	1.5	20.8	1.5	0.6	5.6	0.7	0.16	0.27
Robinie 1	40.8	2.6	20.6	2.4	0.51				
Robinie 2	40.1	3.5	16.2	2.3	0.41	12.3	1.5	0.31	0.76
Robinie 3	38.3	3.5	16.9	4.1	0.45	11.3		0.3	0.67
Weide 1	18.3	2.4	6.8	1.3	0.38	4.5		0.25	0.66
Weide 2	22.9	2.4	8	1.5	0.36	5.4	0.9	0.24	0.68
Weide 3	18.3	2.2	5.8	0.9	0.32	4.2	0.2	0.23	0.72
Eukalyptus1	42.9	4.4	15.2	3.2	0.35	17.8	4.1	0.41	1.17
Eukalyptus2	45.2	3.5	22.2	5.1	0.49	16.7	3.5	0.37	0.75
Eukalyptus3	39	2.5	20.2	5	0.52	19.1	3.4	0.49	0.95
Eukalyptus4	37.6	3.3	12.4	4.4	0.33	16.4	2.9	0.44	1.32

Tabelle 3.3: Mittelwerte und Standardabweichungen der radialen und tangentialen Biegefestigkeiten, der Druckfestigkeiten in Faserrichtung sowie deren Relationen zueinander aller untersuchten Laubbäume bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen.

		Druckfestigkeit longitudinal		Biegefestigkeit radial		rad. Biegef. / long. Druckf. Mittelwert
		Mittelwert	Stdabw.	Mittelwert	Stdabw.	
Fichte	1	22.3	2.87	6	1.46	0.28
Fichte	2	27.7	4.21	6.5	2.25	0.24
Fichte	3	30.9	4.06	6.5	2.75	0.22
Fichte	4	33.7	6.32	7.6	2.35	0.25
Strobe	1	24.9	3.35	5.4	1.32	0.21
Strobe	2	26.6	3.37	6	1.67	0.23
Strobe	3	25.5	4.4	6.8	2.16	0.3
Strobe	4	28.2	3.72	11.2	2.5	0.4
Kiefer	1	26.2	3.05	6.4	1.88	0.24
Kiefer	2	27.5	6.13	6.1	2.48	0.22
Kiefer	3	31.8	6.87	7.4	4.24	0.24
Kiefer	4	25.1	4.77	7.2	2.6	0.28
Douglasie	1	25.3	4.6	8.4	3.57	0.33
Douglasie	2	28.9	5.82	8.1	4.3	0.27
Douglasie	3	28.8	4.63	11.1	3.54	0.38
Douglasie	4	44.1	7.39	10.9	3.25	0.25
Lärche	1	33	4.76	7.2	3.26	0.22
Lärche	2	28.9	6.67	4.7	2.64	0.16
Lärche	3	33.6	8.73	5.7	2.52	0.17
Lärche	4	37.3	9.71	8.6	3.8	0.24

Tabelle 3.4: Mittelwerte und Standardabweichungen der radialen Biegefestigkeiten und der Druckfestigkeiten in Faserrichtung sowie deren Relationen zueinander aller untersuchten Nadelbäume bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen.

Um einen etwas besseren Überblick über die erzielten Meßwerte und deren Abhängigkeiten zu bekommen, sind in Abbildung 3.24 die Mittelwerte der Festigkeitskenngrößen pro Baumart über dem jeweiligen Holzstrahlanteil am Volumen aufgetragen. Die Angaben über die Holzstrahlanteile am Volumen entstammen der Arbeit von MYER (MYER, 1922). Es zeigt sich, daß die radiale Biegefestigkeit entscheidend vom jeweiligen Holzstrahlanteil am Volumen beeinflusst wird. Bäume mit hohem Holzstrahlanteil wie z.B. Ahorn, Platane, Robinie und Eiche besitzen deutlich höhere radiale Biegefestigkeiten als Bäume mit geringem Holzstrahlanteil wie z.B. Nadelhölzer, Weide, Pappel oder Edelkastanie. Die Douglasie, als einziger Nadelbaum mit ein- und zweireihigen Holzstrahlen, lieferte etwas höhere Werte als die anderen Nadelbäume mit einreihigen Holzstrahlen. Bei den Laubbäumen spielt zusätzlich die Anordnung der Gefäße eine Rolle. Ringporige Bäume benötigen in der Regel höhere Holzstrahlanteile als zerstreutporige Bäume, um ähnliche radiale Biegefestigkeiten zu erreichen. Beispiele hierfür sind Eiche oder Robinie im Vergleich zu Platane oder Ahorn, Esche im Vergleich zu Birke und Edelkastanie im Vergleich zu Pappel oder Weide. Demnach besitzen zerstreutporige Laubbäume mit hohem Holzstrahlanteil die höchsten, ringporige Laubbäume mit geringem Holzstrahlanteil die niedrigsten radialen Biegefestigkeiten. Die Anordnung der Gefäße spielt bei den Absolutwerten der gemessenen tangentialen Biegefestigkeiten eine noch größere Rolle. Die ringporigen Laubbäume besitzen aufgrund der sehr guten Festigkeitseigenschaften des Spätholzes in der Regel die höchsten tangentialen Biegefestigkeiten (GUTMANN, 1995). Bei der Druckfestigkeit in Faserrichtung spiegelt sich die Korrelation mit der radialen Biegefestigkeit bei Laubbäumen wieder. Mit Ausnahme von Platane und Edelkastanie wird bei Laubbäumen auch die Druckfestigkeit in Faserrichtung vom Holzstrahlanteil beeinflusst, die bereits angesprochene stabilisierende Wirkung der Holzstrahlen gegen Ausknickungen vor allem in radialer Richtung wird hier nochmals bestätigt.

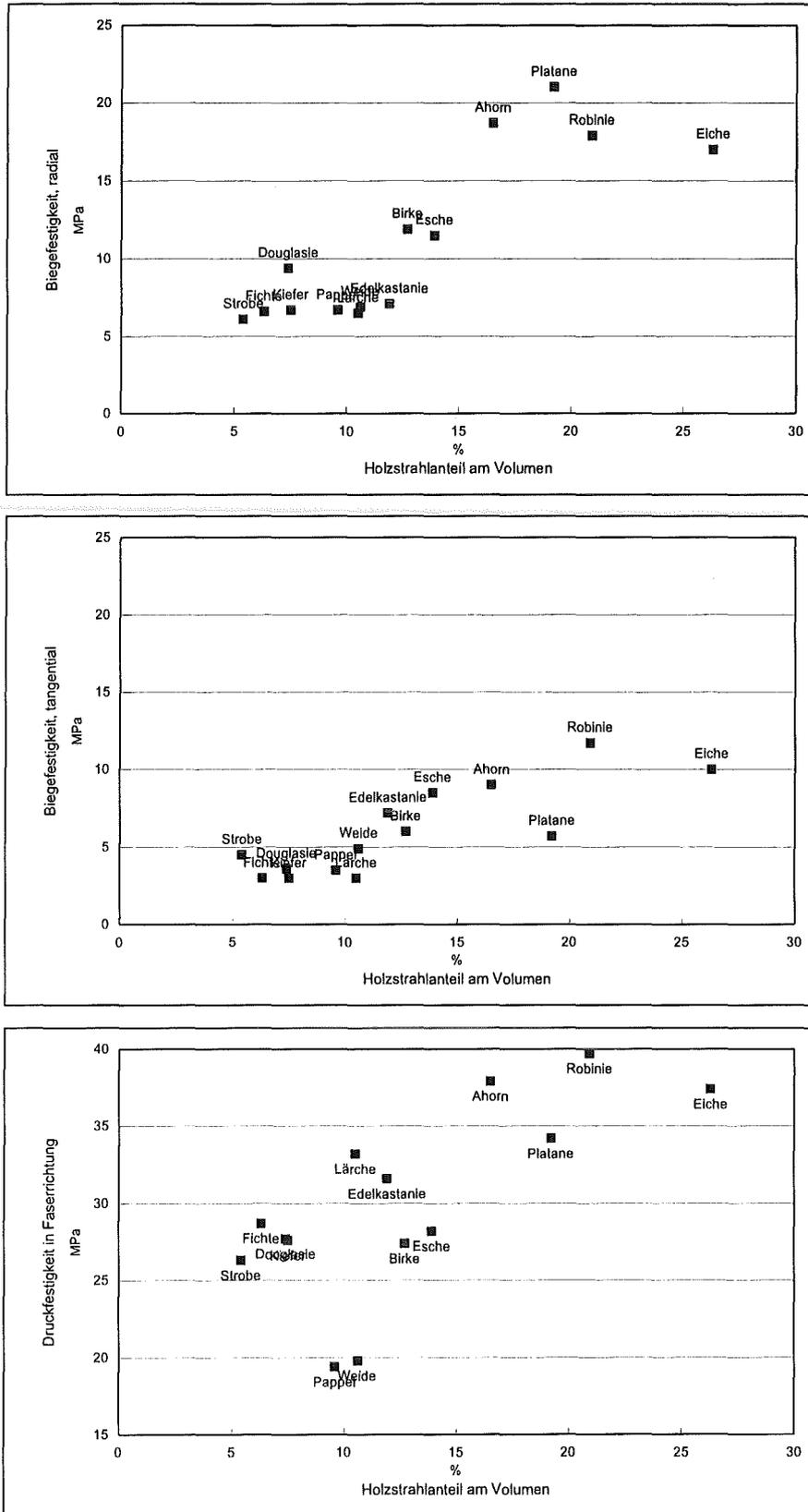


Abbildung 3.24: Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen je Baumart bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen, dargestellt über deren Holzstrahlanteil am Volumen. Die Angaben über die Holzstrahlanteile am Volumen entstammen der Arbeit von MYER (MYER, 1922).

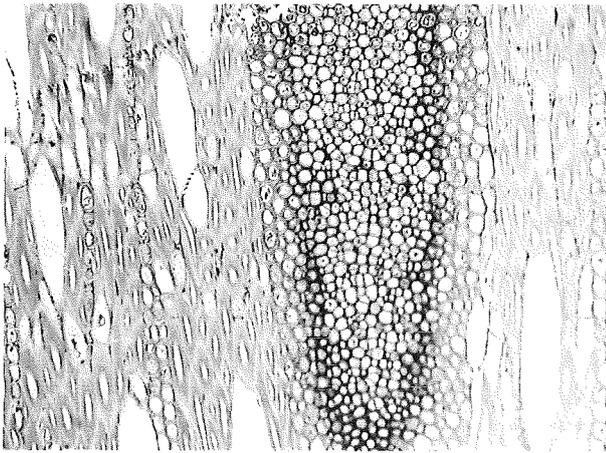
Eine Erklärung für die Sonderstellung von Platane könnte darin liegen, daß ein bestimmter Sättigungsprozentsatz des Holzstrahlanteils bei zerstreutporigen Bäumen überschritten wird. Hierdurch werden zwar sehr hohe radiale Biegefestigkeiten, aber im Gegenzug niedrigere tangential Biegefestigkeiten aufgrund der hohen Anzahl von tangentialen Trennflächen zwischen Holzstrahlen und Längsfasern erreicht. Weiter existieren niedrigere Druckfestigkeiten in Faserrichtung aufgrund der weniger vorhandenen Längsfasern. Bei ringporigen Bäumen werden diese „Mängel“ möglicherweise durch das Spätholz kompensiert. Die Sonderstellung von Edelkastanie läßt sich dadurch erklären, daß sie in ihrem Aufbau den Nadelhölzern ähnlich ist, wenn man vernachlässigt woraus jeweils das Früh- bzw. Spätholz gebildet wird.

Um einen etwas besseren Eindruck über die Größenverhältnisse zu gewinnen, sind in den Abbildungen 3.25 bis 3.27 für neun verschiedene Baumarten lichtmikroskopische Aufnahmen¹³ von Tangentialschnitten mit 150facher Vergrößerung sowie die ermittelten Festigkeitsrelationen dargestellt. Die untersuchten Baumarten lassen sich bezüglich ihres anatomischen Aufbaus und ihrer Festigkeitsrelationen in sechs bzw. drei Gruppen einteilen. Innerhalb dieser Gruppen finden sich Baumarten mit ähnlichem anatomischem Aufbau und ähnlichen Festigkeitsrelationen. In Abbildung 3.28 sind die einzelnen Gruppen mit ihren Ordnungsmerkmalen in einer Tabelle zusammengefaßt. Ebenso wurde in einem Diagramm deren Festigkeitsrelationen von der Druckfestigkeit in Faserrichtung zu radialer Biegefestigkeit über der radialen Biegefestigkeit zu tangentialer Biegefestigkeit aufgetragen. Die Ordnungsmerkmale waren die Gefäßanordnung (bei Laubbäumen) und der Holzstrahlanteil am Volumen bzw. die Festigkeitsrelationen. Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß sich die Verhältnisse von radialer Biegefestigkeit zu tangentialer Biegefestigkeit bei zerstreutporigen Bäumen zwischen 1,7 und 3,7, bei ringporigen zwischen 1,1 und 1,5 sowie bei Nadelbäumen zwischen 1,1 und 1,4 bewegten. Die Verhältnisse von Druckfestigkeit in Faserrichtung zu radialer Biegefestigkeit lagen bei den zerstreutporigen Bäumen zwischen 1,6 und 3, bei den ringporigen zwischen 2,2 und 4,2 sowie bei den Nadelbäumen um 4. Das Verhältnis von radialer Biegefestigkeit zu tangentialer Biegefestigkeit war also bei zerstreutporigen Bäumen in der Regel größer als bei ringporigen Bäumen und bei Nadelbäumen und nahm dabei jeweils mit steigendem Holzstrahlanteil zu. Dies vollzog sich innerhalb gewisser Bandbreiten. Das Verhältnis von Druckfestigkeit in Faserrichtung zu radialer Biegefestigkeit nahm sowohl bei zerstreutporigen Bäumen als auch bei ringporigen Bäumen mit steigendem Holzstrahlanteil ab. Die Gruppen 2, 3 und 4, zu denen alle untersuchten Laubbäume außer Platane und Edelkastanie gehören, lassen sich für die Praxis und mit weniger strengen Maßstäben zu einer Gruppe zusammenfassen.

Für diese Gruppe konnten folgende Faustregeln formuliert werden:

- Das Verhältnis von Druckfestigkeit in Faserrichtung zu radialer Biegefestigkeit lag bei 2 oder wenig darüber ($< 2,9$),
- das Verhältnis von radialer Biegefestigkeit zu tangentialer Biegefestigkeit lag bei 2 oder wenig darunter ($> 1,5$).

¹³ Die lichtmikroskopischen Aufnahmen wurden freundlicherweise von Herrn Dr. F. W. M. R. Schwarze, Institut für Forstbotanik und Baumphysiologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, zur Verfügung gestellt.



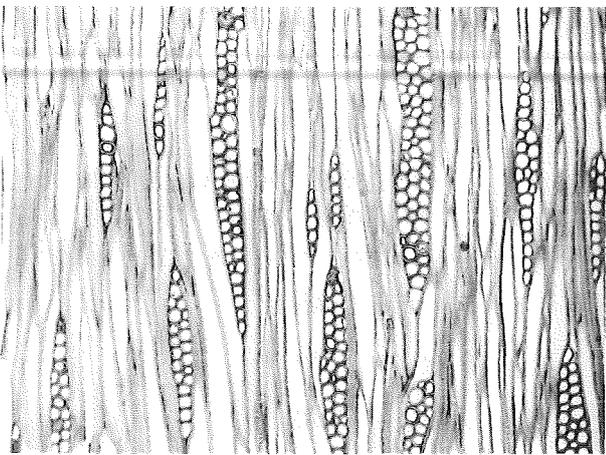
Rotbuche
(*Fagus sylvatica* L.)

- zerstreutporig
- Holzstrahlhöhe mehrere mm
- Holzstrahlbreite 1..25 Reihen

$$\sigma_B^r \approx 2\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 4\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 2\sigma_B^r$$



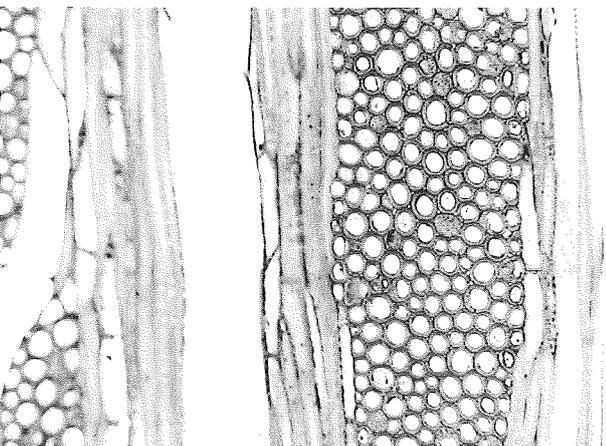
Bergahorn
(*Acer pseudoplatanus* L.)

- zerstreutporig
- Holzstrahlhöhe ca. 0,5 mm, oft über 1 mm (60-70 Zellen)
- Holzstrahlbreite 1..6 Reihen

$$\sigma_B^r \approx 2\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 4\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 2\sigma_B^r$$



Platane
(*Platanus x acerifolia* (Ait.) Willd.)

- zerstreutporig
- Holzstrahlhöhe 1..2 mm
- Holzstrahlbreite 1..12 Reihen

$$\sigma_B^r \approx 3,7\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 6\sigma_B^t$$

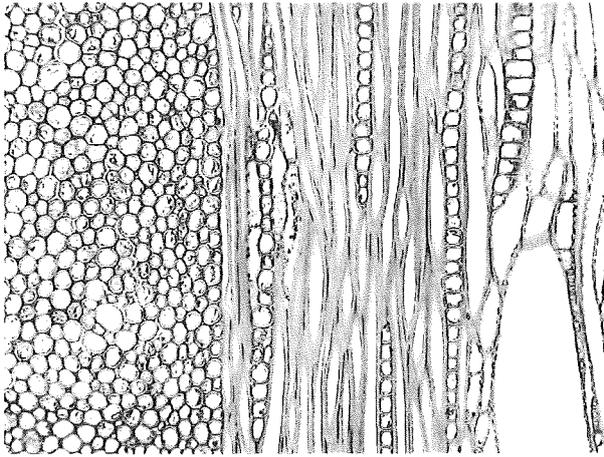
$$\sigma_D^l \approx 1,6\sigma_B^r$$

σ_B^r Biegefestigkeit, radial

σ_B^t Biegefestigkeit, tangential

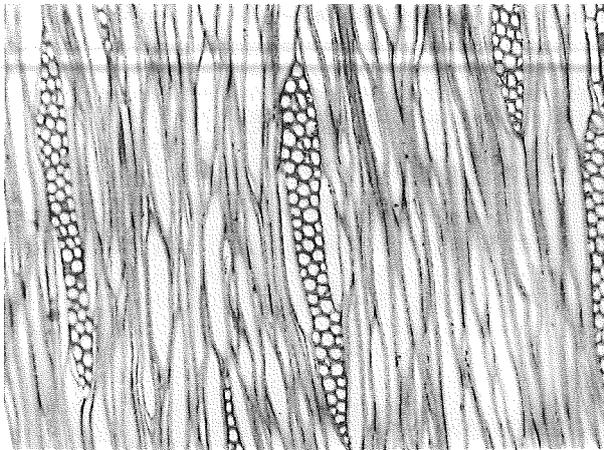
σ_D^l Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.25: Tangentialschnitte bei 150facher Vergrößerung und ermittelte Festigkeitsrelationen an zerstreutporigen Bäumen bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen (Lichtmikroskopische Aufnahmen: F. Schwarze).



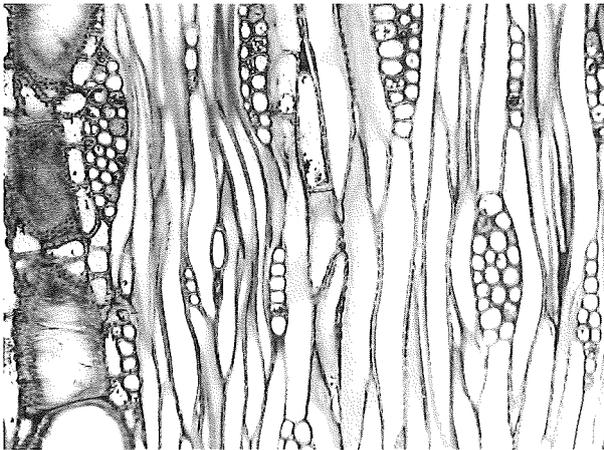
Stieleiche
(*Quercus robur* L.)

- ringporig
 - Holzstrahlhöhe ca. 25 Zellen bis mehrere cm
 - Holzstrahlbreite 1..20 Reihen
- $$\sigma_B^r \approx 1,5\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 3,3\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 2,2\sigma_B^r$$



Robinie
(*Robinia pseudoacacia* L.)

- ringporig
 - Holzstrahlhöhe ca. 0,6 mm (50 Zellen)
 - Holzstrahlbreite 1..6 Reihen
- $$\sigma_B^r \approx 1,45\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 3,2\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 2,2\sigma_B^r$$

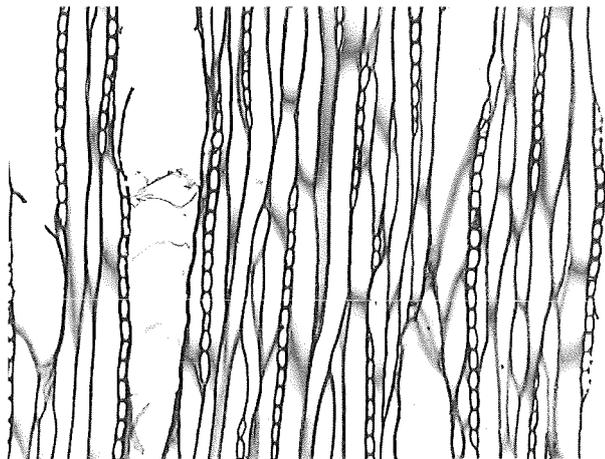


Esche
(*Fraxinus excelsior* L.)

- ringporig
 - Holzstrahlhöhe ca. 10 Zellen
 - Holzstrahlbreite 1..5 Reihen
- $$\sigma_B^r \approx 1,4\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 3,3\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 2,35\sigma_B^r$$

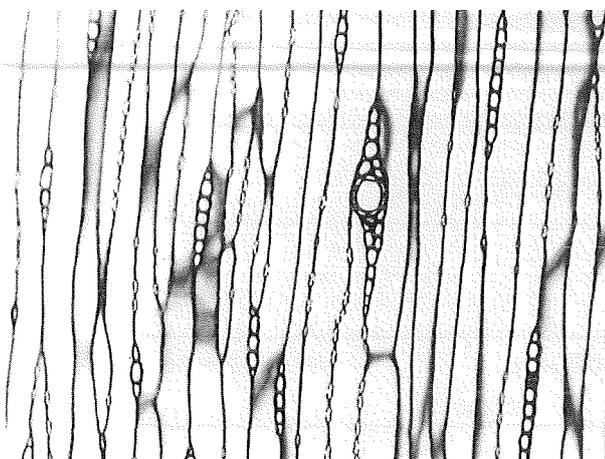
- σ_B^r Biegefestigkeit, radial
 σ_B^t Biegefestigkeit, tangential
 σ_D^l Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.26: Tangentialschnitte bei 150facher Vergrößerung und ermittelte Festigkeitsrelationen an ringporigen Bäumen bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen (Lichtmikroskopische Aufnahmen: F. Schwarze).



Schwarzpappel (*Populus nigra* L.)

- zerstreutporig
 - Holzstrahlhöhe 3..5 Zellen, teilweise bis 30 Zellen
 - Holzstrahlbreite einreihig
- $$\sigma_B^r \approx 1,7\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 5\sigma_B^t$$
- $$\sigma_D^l \approx 2,9\sigma_B^r$$



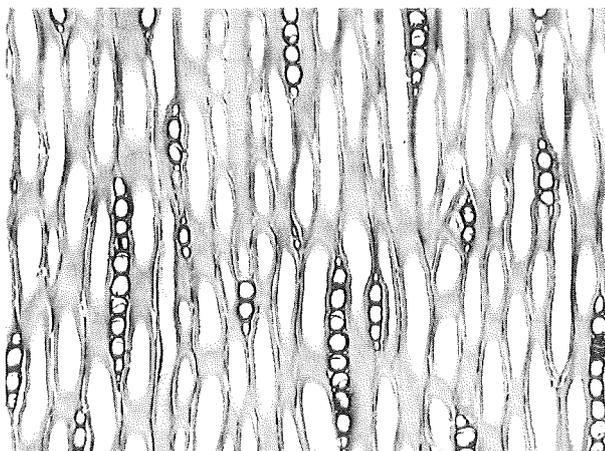
Rotfichte (*Picea abies* (L.) Karst.)

- Holzstrahlhöhe 3..11 Zellen, teilweise bis 20 Zellen
- Holzstrahlbreite einreihig

$$\sigma_B^r \approx 1,4\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 5,6\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 4\sigma_B^r$$



Kiefer (*Pinus sylvestris* L.)

- Holzstrahlhöhe 1..15 Zellen
- Holzstrahlbreite einreihig

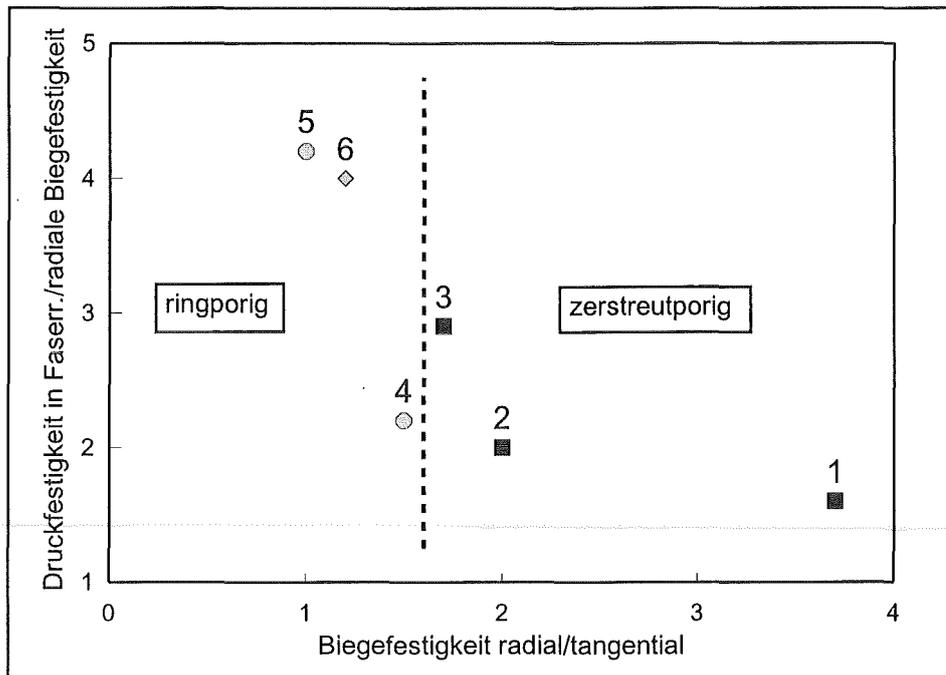
$$\sigma_B^r \approx 1,35\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 5,4\sigma_B^t$$

$$\sigma_D^l \approx 4\sigma_B^r$$

- σ_B^r Biegefestigkeit, radial
 σ_B^t Biegefestigkeit, tangential
 σ_D^l Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.27: Tangentialschnitte bei 150facher Vergrößerung und ermittelte Festigkeitsrelationen an Nadelbäumen und an Pappel bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen (Lichtmikroskopische Aufnahmen: F. Schwarze).



	Laubbäume		Nadelbäume
	zerstreutporig	ringporig	-
Holzstrahlanteil ≥ 20% mehrreihig	1 z.B. Platane	4 z.B. Eiche, Robinie	-
Holzstrahlanteil ~ 15% mehrreihig	2 z.B. Buche, Ahorn, Birke	4 z.B. Esche	-
Holzstrahlanteil ≤ 10% einreihig	3 z.B. Pappel, Weide	5 z.B. Edelkastanie	6 z.B. Fichte, Kiefer, ...

Abbildung 3.28: Einteilung der untersuchten Baumarten bezüglich ihrer Festigkeitsrelationen und ihres anatomischen Aufbaus in sechs Gruppen bei Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen.

Um nun auch einen Überblick über die Verteilung der Festigkeitskenngrößen und deren Relationen im Baum zu erhalten, wurden an einer geraden und gesunden Rotbuche bzw. einer geraden und gesunden Douglasie über einer Länge von 1,5 m bzw. 1 m in geringen Abständen in einer Ebene Bohrkerne entnommen und inkrementweise geprüft. Die so erzielten feinen Auflösungen der einzelnen Festigkeitskenngrößen und deren Relationen zueinander bei geraden Bäumen können dann zum Vergleich Bäumen mit Abweichungen von der „Normalgestalt“

gegenübergestellt werden. Hierdurch ist es später möglich, zwischen Festigkeitsanstiegen im fehlerfreien und geraden Baum mit „Normalgestalt“ und lastgesteuerten Festigkeitsanstiegen als Optimierungsmechanismen eines Baumes zu differenzieren.

In Abbildung 3.29 ist die untersuchte Rotbuche als Foto mit den Bohrkernentnahmestellen und das zur Darstellung benutzte FE-Netz mit den Knoten im Meßbereich als Meßstellen der Festigkeitskenngrößen dargestellt. Der untersuchten Rotbuche wurden von 0,5 m bis 2 m Höhe in einer Ebene im Abstand von 5 cm insgesamt 30 Bohrkernentnahmestellen in radialer Richtung entnommen, wobei die Länge der Bohrkernentnahmen genau den Durchmesser in der jeweiligen Meßhöhe entsprachen. Dies ergab insgesamt 1560 Meßwerte, jeweils 780 Meßwerte der Druckfestigkeit in Faserrichtung und der radialen Biegefestigkeit. Weiter wurden 60 tangentiale Bohrkernentnahmen, je 30 an den beiden Außenseiten, senkrecht zur Ebene und in etwa gleicher Höhe der radialen Bohrkernentnahmen im äußeren Bereich entnommen. Die Prüfung der tangentialen Biegefestigkeiten erfolgte im entsprechenden Schnittpunkt mit der Radialebene.

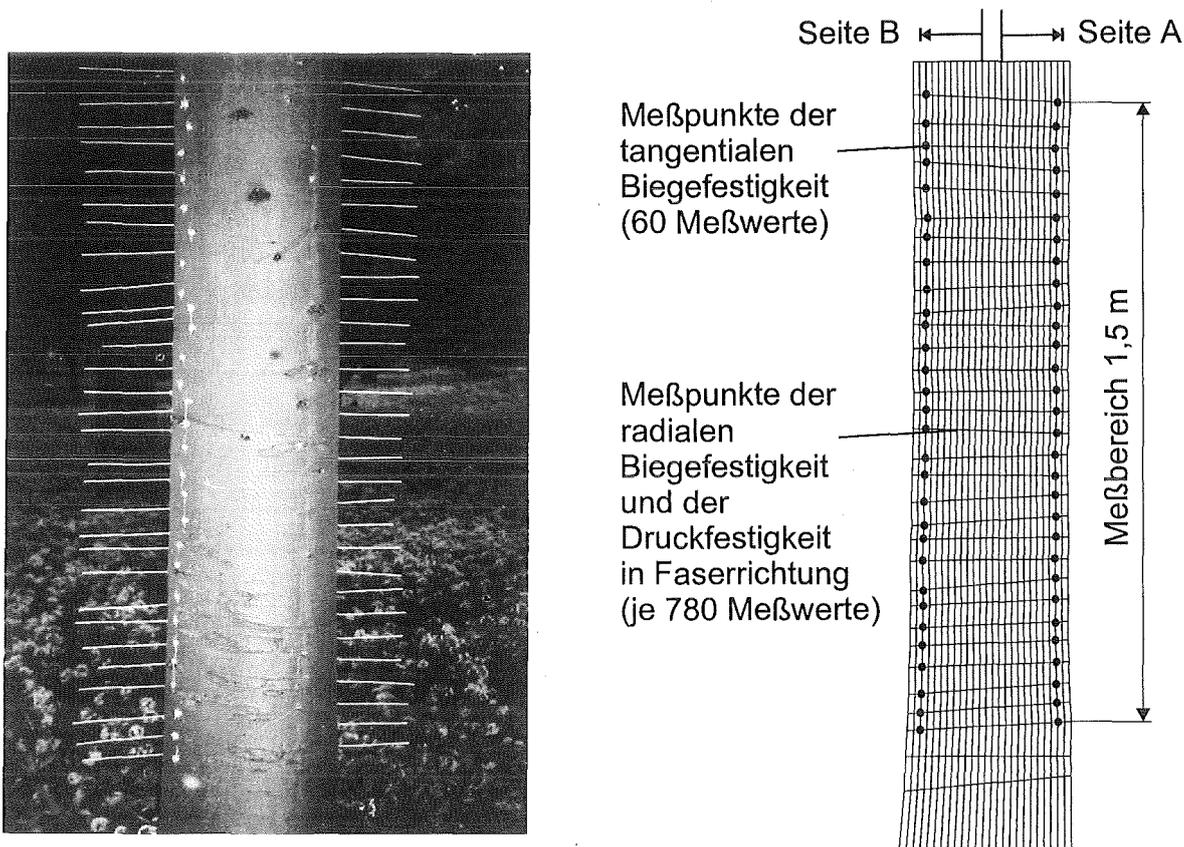


Abbildung 3.29: Entnahmestellen der Bohrkernentnahmen in radialer und tangentialer Richtung, sowie Meßorte der Festigkeitskenngrößen an einer Buche. Untersucht wurden die Verteilungen der radialen und tangentialen Biegefestigkeit, der Druckfestigkeit in Faserrichtung und deren Verhältnisse.

Die Mittelwerte der Druckfestigkeiten in Faserrichtung und der radialen Biegefestigkeiten (die Meßwerte in Marknähe wurden bei dieser Darstellung nicht berücksichtigt) je Höhe sowie die zugehörigen tangentialen Biegefestigkeiten, sind in Abbildung 3.30 je für die Seite A (rechts vom Mark) und für die Seite B (links vom Mark) über der Höhe aufgetragen. Die Festigkeitsrelationen entsprachen denen der zuvor untersuchten geraden Rotbuchen. Die radialen Biegefestigkeiten waren unterhalb einer Höhe von 0,6 m höher als im übrigen Bereich, dort blieben sie dann relativ konstant. Die anderen Festigkeitskenngrößen waren über der gesamten Meßhöhe weitgehend konstant. Seite A besaß etwas höhere Festigkeitswerte als Seite B, es lag die Vermutung nahe, daß Seite A die mehr windabgewandte Baumseite war. Dies bedeutet, daß Seite A wahrscheinlich die Druckseite der Biegung war und deshalb dort etwas höhere Festigkeitseigenschaften besaß. Da alle Festigkeitskenngrößen betroffen waren, reagierte dieser Baum demnach auf höhere Druckbelastungen durch Erhöhung aller gemessenen Festigkeitskenngrößen, wenn auch nicht in gleichem Maße. Dies wäre im Fall einer Druckbelastung auch durchaus sinnvoll. Zur Verifizierung der oben getroffenen Aussagen waren weitere, aussagekräftige Untersuchungen an druckbelasteten Baumabschnitten erforderlich, deren Ergebnisse in Kapitel 3.4 und 3.5 vorgestellt werden. In Abbildung 3.31 sind die Verteilungen der Druckfestigkeit in Faserrichtung und der radialen Biegefestigkeit sowie deren Relation zueinander im gesamten Meßbereich abgebildet. Die Darstellung der Meßwerte erfolgte mittels der fiktiven Vorgabe einer Temperaturverteilung (Meßwerte) im FE-Programm ABAQUS und Ausgabe als Farbverlauf im Postprozessor FEMVIEW (1991). Die Graustufenverläufe wurden so gewählt, daß die hier gezeigten Verteilungen später mit denen von gekrümmten Buchen verglichen werden können. Bei der Verteilung der radialen Biegefestigkeiten befanden sich im unteren Meßbereich erhöhte Werte. In der Stammitte bzw. in Marknähe lagen geringere Werte vor, da dort zwangsläufig tangentiale Biegefestigkeiten gemessen wurden, will man die Biegefestigkeiten eines Baumes in einer radialen Ebene ermitteln. Rechts vom Markstrang (Seite A) waren die Werte ebenfalls etwas erhöht. Geringere Werte in der Stammitte und erhöhte Werte rechts vom Markstrang wies auch die Verteilung der Druckfestigkeiten in Faserrichtung auf, zusätzlich befanden sich im äußeren, oberen Bereich links vom Markstrang (Seite B) leicht niedrigere Druckfestigkeiten. Die Verteilung der Relation dieser beiden Festigkeitskenngrößen zueinander spiegelte nahezu die Verteilung der radialen Biegefestigkeiten wieder. Eine Ausnahme war der äußere, obere Bereich links vom Markstrang (Seite B) der die dort etwas niedrigeren Druckfestigkeiten wiedergab. Insgesamt waren die einzelnen Verteilungen jedoch gleichmäßig und ohne ausgeprägte Festigkeitsunterschiede.

Die untersuchte Douglasie ist in Abbildung 3.32 dargestellt. Die Zeichnung zeigt schematisch die Stellen der Bohrkernentnahmen. Es wurden jeweils in West-Ost- und in Nord-Süd-Richtung von 0,8 m bis 1,8 m Höhe in einer Ebene im Abstand von 10 cm insgesamt 22 Bohrkern in radialer Richtung entnommen. Die Länge der Bohrkern entsprach auch hier den Durchmessern in der jeweiligen Meßhöhe. Der Durchmesser betrug bei der untersten Meßstelle 0,24 m, bei der obersten 0,2 m. Die Abbildung 3.33 zeigt die Verteilungen der Druckfestigkeit in Faserrichtung und der radialen Biegefestigkeit sowie deren Relation zueinander im gesamten Meßbereich. Die Darstellung der Meßwerte erfolgte auch hier mittels der fiktiven Vorgabe einer Temperaturverteilung im FE-Programm ABAQUS und anschließender Visualisierung im Postprozessor FEMVIEW (1991). Die Graustufenskalen wurden so gewählt, daß die gezeigten Verteilungen später mit denen von gekrümmten Douglasien verglichen werden konnten.

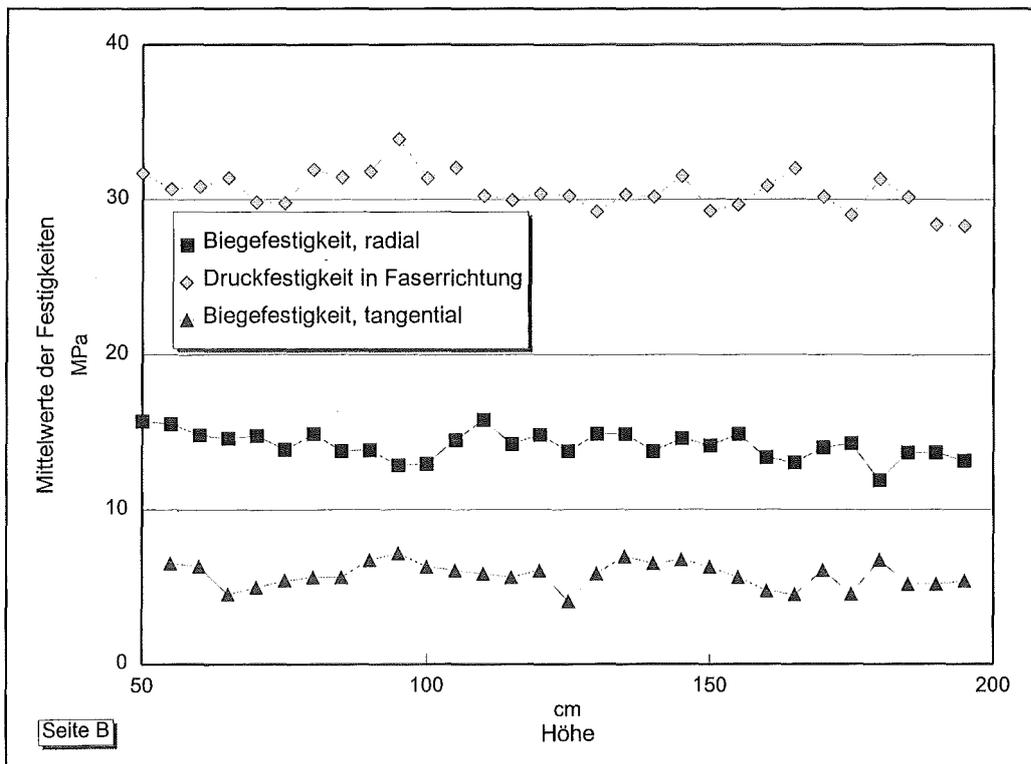
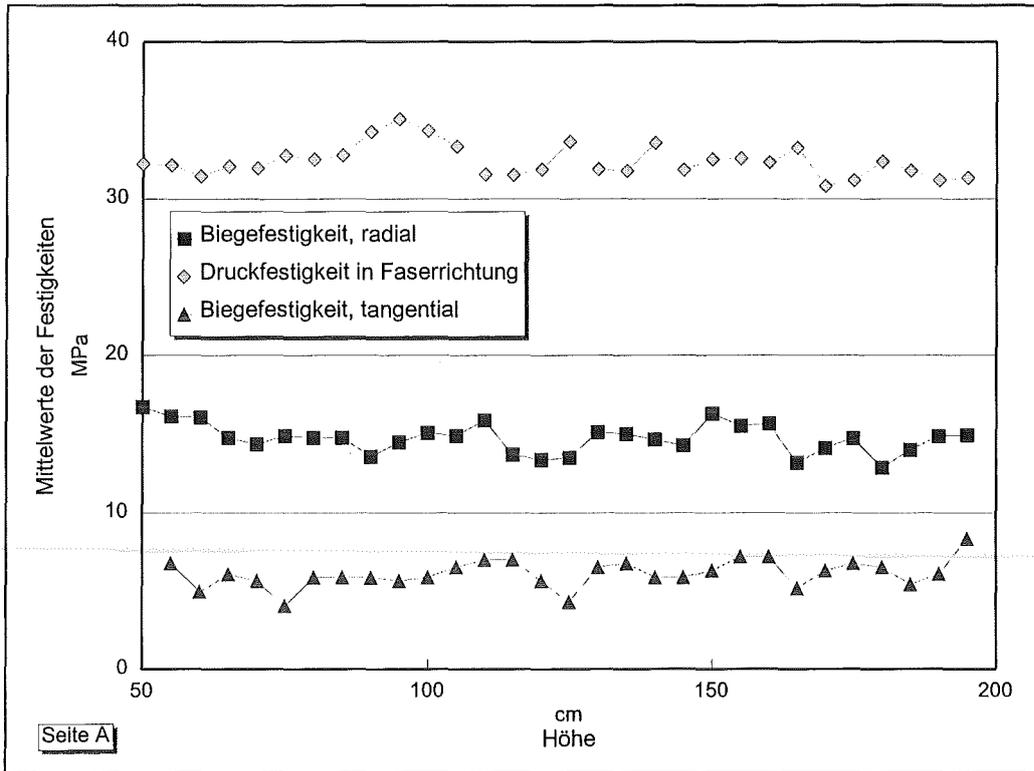


Abbildung 3.30: Mittelwerte der Druckfestigkeiten in Faserrichtung und der radialen Biegefestigkeiten (die Meßwerte in Marknähe wurden bei dieser Darstellung nicht berücksichtigt) je Höhe sowie die zugehörigen tangentialen Biegefestigkeiten je für die Seite A (rechts vom Mark) und für die Seite B (links vom Mark), aufgetragen über der Meßhöhe einer geraden und fehlerfreien Buche (*Fagus sylvatica* L.).

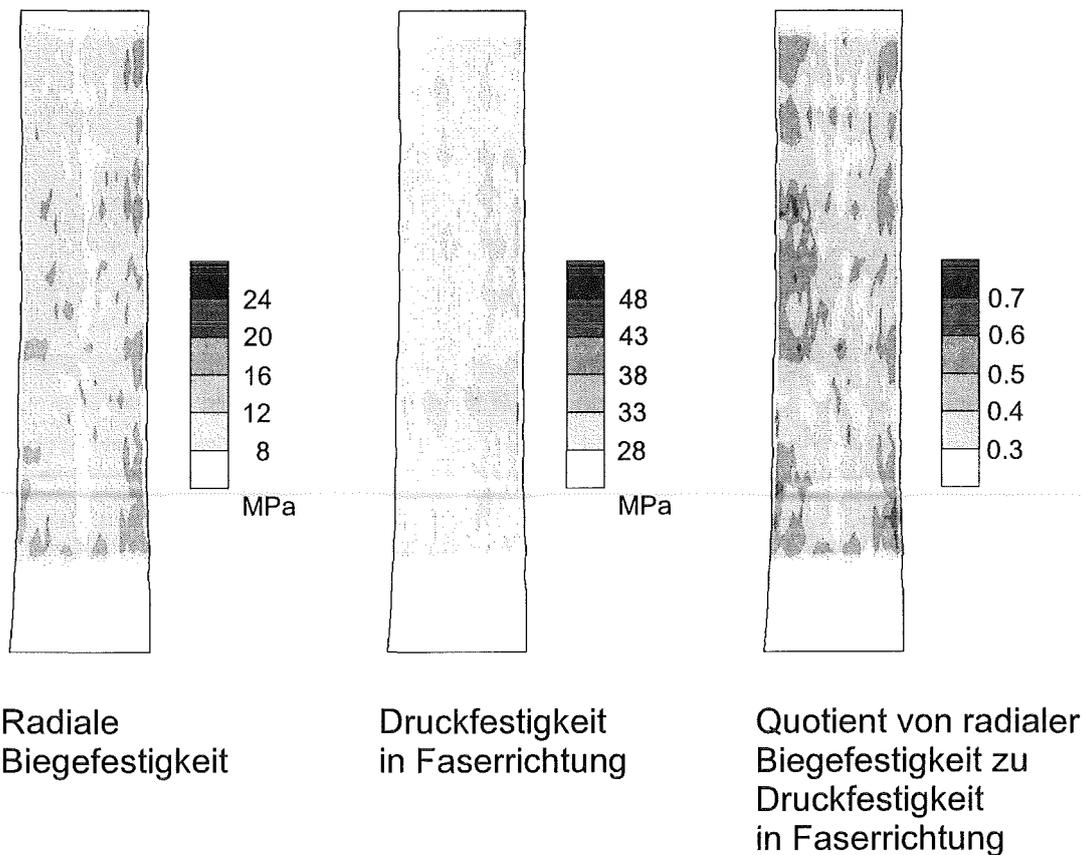


Abbildung 3.31: Verteilungen der Druckfestigkeit in Faserrichtung und der radialen Biegefestigkeit, sowie deren Relation zueinander zwischen 0,5 m und 2 m Höhe bei einer geraden und fehlerfreien Buche (*Fagus sylvatica* L.).

Die Verteilung der radialen Biegefestigkeiten und der Druckfestigkeiten in Faserrichtung waren sowohl in der West-Ost-Ebene, als auch in der Nord-Süd-Ebene gleichmäßig. Die lokalen Festigkeitserhöhungen in ca. 1,4 m Höhe und im unteren Meßbereich resultierten aus eingewachsenen Ästen. Während bei den Druckfestigkeiten in Faserrichtung im Markbereich etwas geringere Werte gemessen wurden, konnten die bei Laubbäumen üblichen, geringeren radialen Biegefestigkeiten im Markbereich nicht festgestellt werden. Ursache hierfür sind die nahezu identischen Biegefestigkeiten in radialer und tangentialer Richtung bei Nadelbäumen.

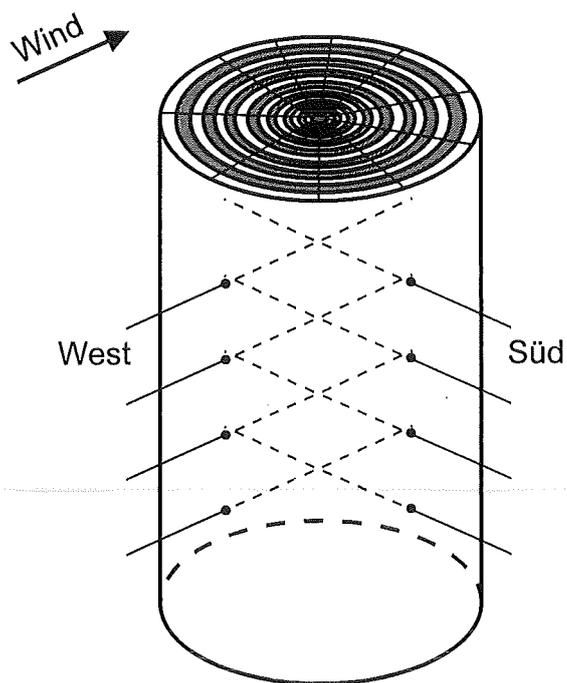
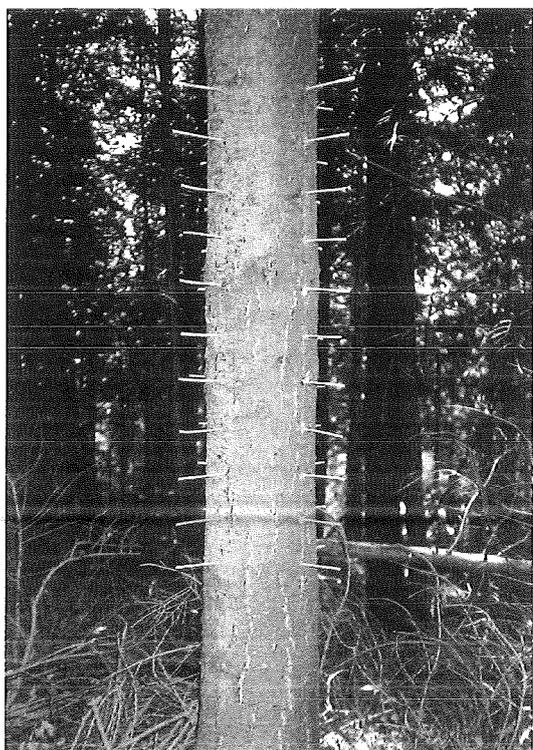


Abbildung 3.32: Entnahmestellen der Bohrkerne in radialer Richtung sowohl in West-Ost- und in Nord-Süd-Richtung an einer geraden und fehlerfreien Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco).

Douglasie
(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco)

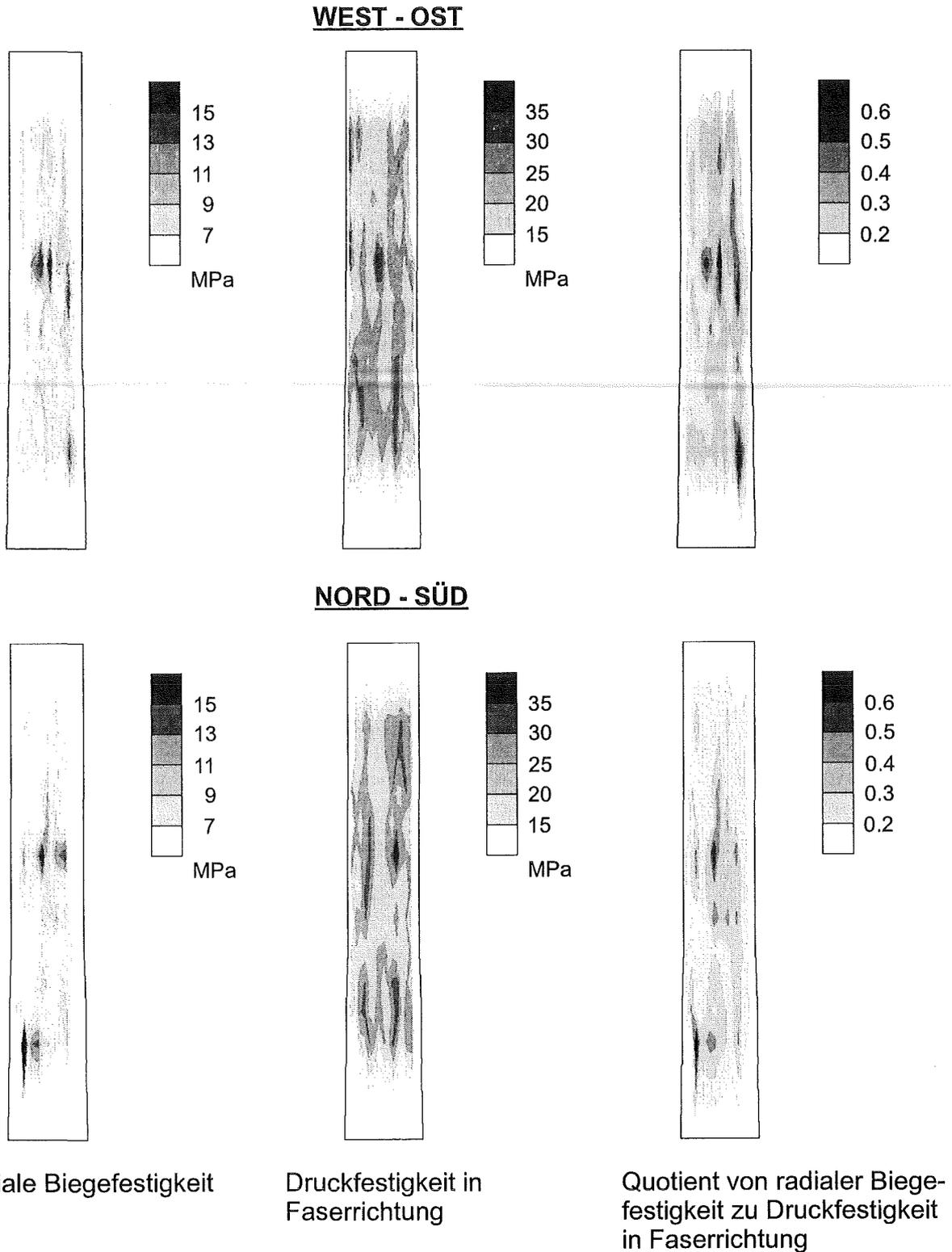


Abbildung 3.33: Verteilungen der Druckfestigkeit in Faserrichtung und der radialen Biegefestigkeit sowie deren Relation zueinander zwischen 0,8 m und 1,8 m Höhe einer geraden und fehlerfreien Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in West-Ost- bzw. Nord-Süd-Richtung.

3.3 Spannungsverteilungen in gekrümmten Baumteilen in und quer zur Faserrichtung

Nachdem die Festigkeitsverteilungen und Festigkeitsrelationen an geraden und fehlerfreien Bäumen untersucht wurde, wird im folgenden zur besseren Veranschaulichung erläutert und diskutiert, welche Spannungsverteilungen bei gekrümmten Baumteilen vorliegen und welche Konsequenzen sich daraus für die Bäume ergeben.

Bei geraden und fehlerfreien Bäumen sind die Spannungsverteilungen im Innern des Stammes aufgrund der äußeren Belastungen leicht zu bestimmen. Je nach Standort erfahren diese Bäume eine mehr oder weniger starke Windbelastung, so daß der Belastungsfall eines fest eingespannten und einseitig belasteten Kragträgers vorliegt. Bei geringer Windbelastung oder wechselnden Windrichtungen wird ein gerader Baum gleichmäßig belastet, was sich auch in einer relativ homogenen Festigkeitsverteilung in und quer zur Faserrichtung ausdrückt. Bei einseitiger Windbelastung erfährt ein Baum leeseitig Druckbelastung, luvseitig Zugbelastung. Bäume reagieren darauf mit einer Erhöhung ihrer Festigkeiten auf ihrer Leeseite, wie später noch am Beispiel windbelasteter, schottischer Buchen gezeigt wird. Gekrümmte Baumteile erfahren bei Belastung entgegen ihrer Krümmung, wie z.B. Säbelbäume oder Wurzelanläufe, auf der zugbelasteten Baumseite eine lokale Erhöhung ihrer radial gerichteten Querspannungen. Je kleiner hierbei der Krümmungsradius ist, um so größer sind die Querspannungen und damit die Gefahr der axialen Reißbildung. MATTHECK führte für ebensolche Fälle den Begriff des „Unglücksbalken“ ein (MATTHECK und BURKHARDT, 1991; MATTHECK, 1992a; MATTHECK und BRELOER, 1994). ALBRECHT fand, daß solche Bäume dem drohenden Versagen infolge Querspaltung durch eine lokale Erhöhung ihrer radialen Querfestigkeit entgegenwirken (ALBRECHT, 1995; ALBRECHT et al., 1995). Das Kambium kann durch Materialzuwachs dieser Gefahr nicht entgegenwirken, denn die Querspannungen liegen im Innern dieser „Unglücksbalken“. Eine Erhöhung der Materialqualität oder der radialen Wachstumsspannungen stellen die einzigen Möglichkeiten dar, dem zu begegnen. Letztere wurde jedoch noch nicht untersucht und scheint auch eher unwahrscheinlich aufgrund des sehr lokalen Auftretens der Querspannungen. In Abbildung 3.34 ist die Entstehung dieser Querspannungen an einem Wurzelanlauf skizziert und die Ergebnisse einer Finite-Elemente-Rechnung am Beispiel des berg- und luvseitigen Wurzelanlaufes einer Fichte (Fichte 1) dargestellt. Die Darstellung der Längsdruckspannungen (minimale Hauptspannungen auf der Druckseite der Biegung) und der Querspannungen (minimale Hauptspannungen auf der Zugseite der Biegung) bei entsprechender Belastungsrichtung, dient zur Verdeutlichung der Spannungsverteilung im Bauminnern. Dabei gilt es zu beachten, daß bei diesem Wurzelanlauf und bei allen anderen untersuchten, gekrümmten Baumteilen stets die Belastung in Richtung einer Begradigung vorherrschte. Der entgegengesetzte Fall (Biegemoment in Richtung der Krümmung) würde nur zeitweise im Fall eines Zurückschwingens auftreten. Die Rechnung erfolgte isotrop, linear elastisch und es wurde mit dem ebenen Dehnungszustand gerechnet (die Analyse erfolgte quasi an einer dünnen Scheibe im Innern des Baumstammes). Belastet wurde die Struktur durch Eigengewicht und durch Windbelastung. Diese wurde mittels Beam-Elementen simuliert, deren Länge der Höhe des Baumes entsprachen und in Wipfelhöhe eine Verschiebung in bzw. entgegen der Vorzugwindrichtung erfuhren. Die Verankerung des Wurzelstranges erfolgte ebenfalls mittels Beam-Elementen, die stammfern entsprechend der natürlichen Vorgabe eingespannt wurden.

Die benutzten Materialkennwerte für Fichte wurden der Literatur entnommen (LAVERS, 1983; U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987). Bei gekrümmten Baumstämmen liegt ebenfalls ein Unglücksbalken mit lokalem Querspannungsmaximum auf der Zugseite der Biegung vor. Hinzu kommen in diesem Falle hohe Druckspannungen in Faserrichtung auf der Druckseite der Biegung. Abbildung 3.35 zeigt dies am Beispiel zweier gekrümmter Buchen, die einer Finite-Elemente-Analyse unterzogen wurden. Die Darstellungen zeigen die Längsdruckspannungen (minimale Hauptspannungen auf der Druckseite der Biegung) und die Querspannungen (minimale Hauptspannungen auf der Zugseite der Biegung). Die Belastungen, Randbedingungen und Materialeigenschaften wurden hier ebenfalls möglichst realitätsnah gewählt. Die Einspannung der Modelle erfolgte mittels Beam-Elementen, die an ihrem Ende in allen Richtungen festgehalten wurden und deren Länge der Modellbreite im unteren Bereich entsprach. Die Windlast wurde ebenfalls mittels Beam-Elementen simuliert, deren Länge der Höhe des Baumes entsprachen und in Wipfelhöhe eine Verschiebung in Richtung einer Begradigung der Modelle erfuhren. Für beide Modelle wurde die gleiche Verschiebung aufgegeben, die Baumhöhen (damit auch die Länge der Beam-Elemente) waren ebenfalls nahezu identisch. Es ist deutlich zu erkennen, daß sich mit zunehmender Krümmung, d.h. kleiner werdendem Krümmungsradius, die Querspannungen erhöhten und die neutrale Faser der Biegung zunehmend in Richtung der konkaven Seite verschoben wurde. Auf der konvexen Seite, der Druckseite der Biegung, lagen hohe Druckspannungen in Faserrichtung vor. Alle hier beschriebenen Rechnungen wurden für den isotropen Fall durchgeführt, weil

- die Verläufe der Radialspannungen bei Rechnung mit orthotropen Materialkennwerten kaum von denen mit isotropen Materialkennwerten abweichen (BETHGE et al., 1992),
- die tatsächlich im Baum vorliegenden Faserverläufe nicht exakt bekannt waren und die Materialorientierung nur „von Hand“ festgelegt werden könnte,
- prinzipielle Aussagen getroffen werden sollten und die exakte Belastungssituation und Einspannung nicht bestimmbar war,
- eine Festlegung der Materialorientierung mittels der CAIO-Methode im Innern der Modelle diese teilweise quer zur Längsachse anordnet, wie am Beispiel eines einseitig eingespannten und an seinem freien Ende mit einer Einzelkraft quer zur Längsachse belasteten Kragträgers von KRIECHBAUM gezeigt wurde (KRIECHBAUM, 1994) und eine Induzierung zusätzlicher Querspannungen stattfinden würde.

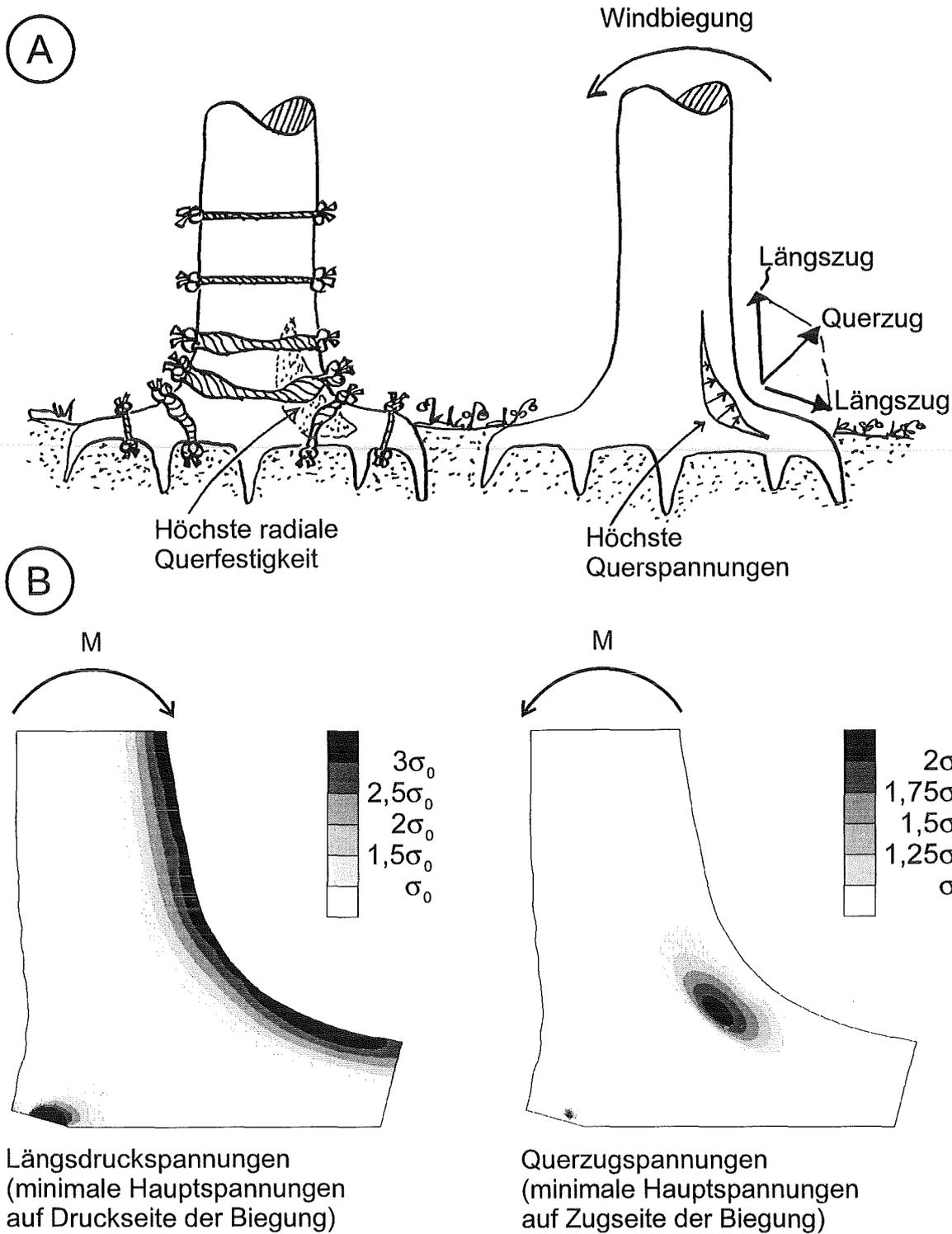
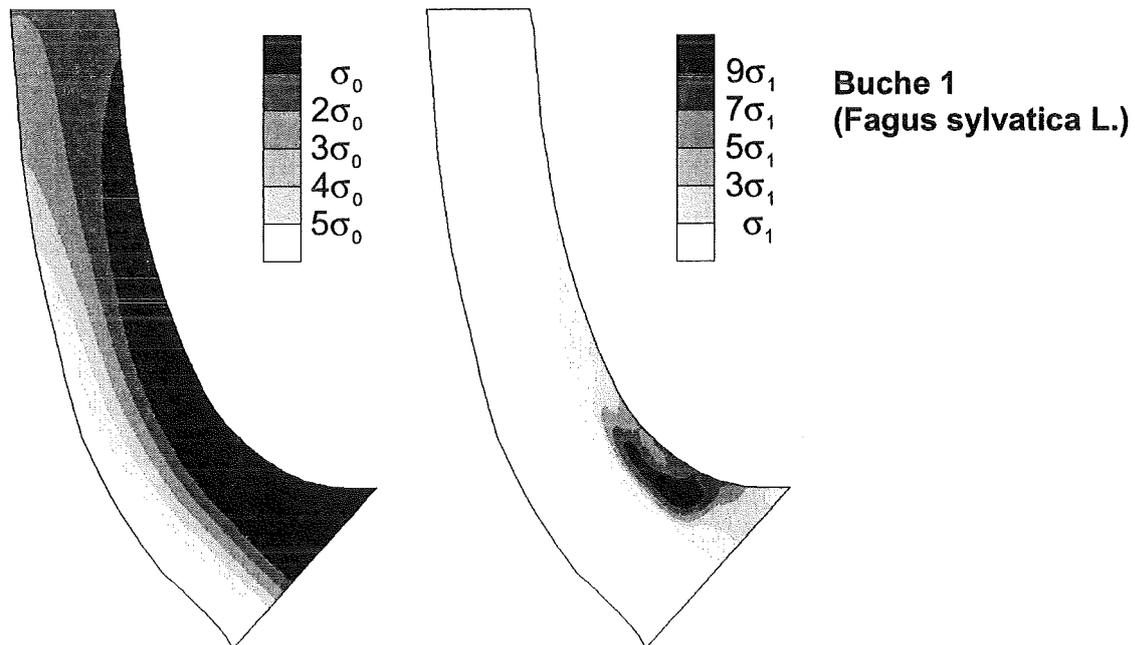
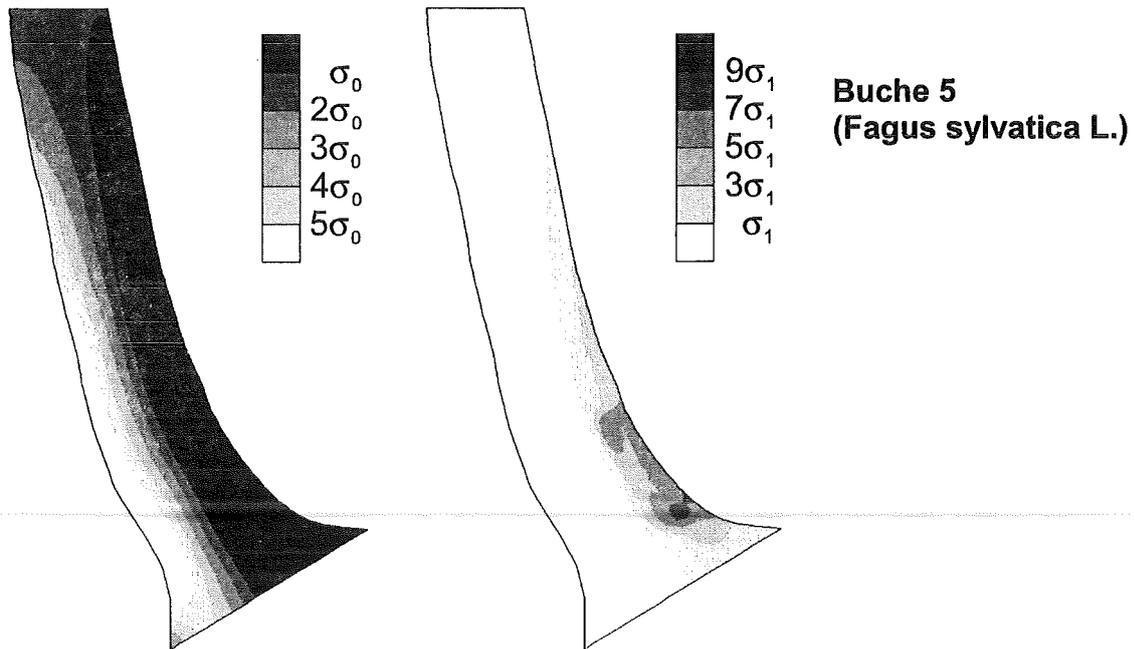


Abbildung 3.34: Belastungssituation in einem Wurzelanlauf: Entstehung eines „Unglücksbalken“ in einem Wurzelanlauf und Anordnung höherer radialer Querspannungen im Bereich hoher Querspannungen als Reaktion von Bäumen, um der Spaltgefahr entgegenzuwirken (A). Darstellung der Längsdruckspannungen bzw. Querspannungen bei Belastung in bzw. entgegen der Krümmungsrichtung (B).



Längsdruckspannungen (minimale Hauptspannungen auf Druckseite der Biegung) Querzugspannungen (minimale Hauptspannungen auf Zugseite der Biegung)

Abbildung 3.35: „Säbelbäume“ erfahren bei Biegung entgegen ihrer Krümmung auf der konvexen Seite hohe Druckspannungen in Faserrichtung und auf der konkaven Seite im Bereich der schärfsten Krümmung hohe Querspannungen in radialer Richtung, die sich mit kleiner werdendem Krümmungsradius erhöhen.

3.4 Festigkeitsverteilungen in gekrümmten Baumteilen in und quer zur Faserrichtung

Nachdem die Spannungsverteilungen in gekrümmten Baumteilen in und quer zur Faserrichtung aufgezeigt wurden, werden im folgenden die entsprechenden Festigkeitsverteilungen gekrümmter Baumteile untersucht. Die Messung mehrerer Festigkeitskenngrößen nahezu am selben Ort ermöglicht eine direkte Gegenüberstellung und die geringe Größe der Probekörper eine feine Auflösung der Festigkeitsverteilungen. Ziel hierbei war es herauszufinden, ob Bäume in der Lage sind, ihre Festigkeiten nicht nur lastgesteuert, sondern auch richtungsabhängig zu verteilen. Für gekrümmte Baumteile stellte sich also die Frage, ob dort wo Querspannungen wirken, auch die radiale Biegefestigkeit höher ist, ohne daß jedoch eine Erhöhung der Druckfestigkeit in Faserrichtung erfolgt.

Das Versagen von Holz quer zur Faser vollzieht sich insbesondere bei Nadelbäumen und ringporigen Laubbäumen hauptsächlich im Frühholz (vgl. Kapitel 2.2.1). Dementsprechend wird die radiale Biegefestigkeit wesentlich von den Eigenschaften der Frühholzzellen und dem Holzstrahlvolumen (vgl. Kapitel 3.2) bestimmt. Besonders druckfeste Spätholzzellen spielen hierbei keine wesentliche Rolle für die radiale Biegefestigkeit und wären reine Materialverschwendung. Weiter war zu klären, wie sich gekrümmte Bäume bezüglich ihrer Festigkeiten bei Druckspannungen in Faserrichtung verhalten. Für diesen Fall wäre neben einer Erhöhung der Druckfestigkeit in Faserrichtung auch eine Steigerung der radialen und tangentialen Biegefestigkeit äußerst sinnvoll. In Kapitel 2 wurde das Versagen von Holz bei Druckbelastung in Faserrichtung bereits eingehend aufgezeigt. In radialer Richtung verhindern die Holzstrahlen ein Ausknicken der Fasern, sie stellen also eine Querverriegelung der Längsfasern dar. Bei Druckbelastung muß die Festigkeit eben dieser Querverriegelung auch gesteigert werden, um das Ausknicken wirkungsvoll zu verhindern. In tangentialer Richtung sind keine Holzstrahlen vorhanden. Bei Druckbelastung in Faserrichtung versagt Holz deshalb auch meist in Form tangentialer Ausknickungen, zusätzlich begünstigt durch die zwar optimal gestaltete, aber dennoch vorhandene Kraftflußumlenkung in Längsrichtung um die Holzstrahlen. Die Längsfasern sind in der Umgebung der im Tangentialschnitt spindelförmigen Holzstrahlen in Umfangsrichtung vorgebogen und knicken leichter aus. DIETRICH fand, daß gekrümmte Bäume auf deren Druckseite deutlich höhere Biegefestigkeiten und Wachstumsspannungen in tangentialer Richtung (Umfangsrichtung) aufweisen, als auf deren Zugseite (DIETRICH, 1995). Die schon im geraden Baum vorhandenen, vorteilhaften Druckeigenstressungen in Umfangsrichtung (vgl. Abb. 2.7) werden auf der Druckseite gekrümmter Bäume also gezielt erhöht, um die Entstehung von Rissen aufgrund querzugbelasteter Holzstrahlen zu verhindern. Um nun auch die Verteilungen der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung zu erhalten, wurden acht gekrümmte Bäume (Säbelbäume), sechs Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und zwei Douglasien (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) sowie sechs Wurzellanläufe von Fichten eingehend untersucht.

Die untersuchten Bäume standen im Pfälzer Wald bei Ramberg (Buchen und Douglasien) bzw. bei Edenkoben (Fichten). Alle Säbelbäume erfuhren eine Biegebelastung in Richtung einer Begradigung. Ihnen wurden von unten nach oben bis zum Erreichen eines geringen Krümmungsgrades im Abstand von je 5 cm in radialer Richtung Bohrkerne entnommen, deren Längen den jeweiligen Baumdurchmessern entsprachen.

Die weitere Vorgehensweise war äquivalent der bei der Darstellung der Festigkeitsverteilungen gerader Bäume (Buche bzw. Douglasie). Die untersuchten Fichten bildeten allesamt eine berg- und luvseitige Brettwurzel aus, in deren Ebene die Bohrkerne, ausgehend von dem horizontal liegenden Wurzelteil unterhalb der Krümmung bis zum Erreichen des geraden Stammabschnitts, ebenfalls in Abständen von 5 cm radial entnommen wurden. In den Abbildungen 3.36 bis 3.43 sind jeweils ein Foto mit den Bohrkernentnahmestellen und die Meßwerte der radialen Biegefestigkeit über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) aufgetragen. Weiter sind die Verteilungen der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relation zueinander als Graustufenflächen der gekrümmten Buchen und Douglasien dargestellt.

Bei den untersuchten Buchen stieg der Krümmungsradius ausgehend von Buche 1 mit dem geringsten Krümmungsradius (d.h. schärfster Krümmung) bis zu Buche 5 mit dem größten Krümmungsradius (d.h. schwächster Krümmung). Buche 6 stellte bezüglich ihrer Geometrie eine Abweichung gegenüber den anderen Säbelbäumen dar, da sich bei diesem Baum der Stamm oberhalb des Meßbereiches wieder vertikal über dem Stammfuß befand. Hierdurch lagen nur in der unteren Hälfte des Meßbereiches hohe Druckspannungen auf der Druckseite der Biegung bzw. lokal hohe Querspannungen auf der Zugseite der Biegung vor.

Buche 1 besaß auf der Druckseite der Biegung sowohl hohe Druckfestigkeiten, als auch hohe radiale Biegefestigkeiten. Auf der Zugseite der Biegung befanden sich im Bereich der schärfsten Krümmung ebenfalls hohe radiale Biegefestigkeiten, weiter stammaufwärts sanken diese wieder auf Werte, wie sie in geraden Buchen vorlagen. Die Druckfestigkeiten entsprachen auf der gesamten Zugseite denen bei geraden Buchen. Deutlich zu erkennen waren geringe radiale Biegefestigkeiten im Bereich des Markstranges. Die niedrigen Werte im Bereich des Markstranges stellten Werte der tangentialen Biegefestigkeit dar, die bei Laubbäumen deutlich unter denen der radialen Biegefestigkeit liegen und auch bei geraden Bäumen gemessen wurden (vgl. Abb. 3.31). Die Festigkeitsrelationen von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung waren hierdurch im Bereich der schärfsten Krümmung überdurchschnittlich hoch und im Bereich des Markstranges niedrig. Es fand auf der Zugseite der Biegung im Bereich des Querspannungsmaximum also keine gleichzeitige Erhöhung beider Festigkeiten statt. Die Druckfestigkeit blieb auf der gesamten Zugseite auf einem niedrigen Niveau. Es lag hier eine eindeutige last- und richtungsabhängige, optimale Verteilung der Festigkeiten vor.

Bei **Buche 2** waren ähnliche Festigkeitsverteilungen festzustellen wie bei Buche 1. Die Höhe der Meßwerte waren aber etwas geringer. Auf der Druckseite der Biegung herrschten hohe Druckfestigkeiten und radiale Biegefestigkeiten. Auf der Zugseite der Biegung befanden sich im unteren Bereich der Krümmung ebenfalls hohe radiale Biegefestigkeiten, weiter stammaufwärts sanken diese wieder auf Werte, wie sie in geraden Buchen vorlagen. Die Druckfestigkeiten entsprachen auf der gesamten Zugseite denen bei geraden Buchen. Zu erkennen waren auch hier geringe radiale Biegefestigkeiten im Bereich des Markstranges. Die Verteilung der Festigkeitsrelationen war ebenfalls mit Buche 1 vergleichbar. Auffällig waren die höheren radialen Biegefestigkeiten im unteren Meßbereich auf der Druckseite, sie könnten eine geometriebedingte Reaktion auf beim Zurückschwingen entstehende Querspannungen aufgrund des Übergangs von einer konvexen zu einer konkaven Krümmung mit geringem Krümmungsradius in diesem Bereich darstellen, so daß auch dieser seltener auftretende Belastungszustand in diesem Fall eine Rolle spielte.

Auch bei **Buche 3** läßt sich das zuvor gesagte wiederholen. Erwähnenswert ist, daß das Gebiet lokal hoher radialer Biegefestigkeiten im unteren Meßbereich der Zugseite ausgedehnter war, und auch hier zeitweise auftretende hohe Querspannungen auf der Druckseite der Grund für erhöhte radiale Biegefestigkeiten sein könnte.

Buche 4 besaß auf der Druckseite der Biegung wiederum hohe Druckfestigkeiten und radiale Biegefestigkeiten. Auf der Zug- und Druckseite der Biegung befanden sich im unteren Bereich der Krümmung ebenfalls erhöhte radiale Biegefestigkeiten, die besonders auf der Zugseite weiter stammaufwärts auf Werte zurückgingen, wie sie in geraden Buchen vorlagen. Die Druckfestigkeiten entsprachen auf der gesamten Zugseite denen bei geraden Buchen. Die Verteilung der Festigkeitsrelationen zeigte nur noch ein kleines Gebiet leicht erhöhter Werte im Bereich der schärfsten Krümmung auf der Zugseite.

Bei **Buche 5** ist der Übergang von einem gekrümmten zu einem schiefen, aber geraden Baum fast vollzogen. Auf der Druckseite der Biegung waren die Druckfestigkeiten und die radialen Biegefestigkeiten deutlich höher als auf der Zugseite, wo Werte analog denen bei geraden Buchen gemessen wurden. Die Verteilung der Festigkeitsrelationen entsprach eher der einer geraden Buche, die hohen Festigkeiten auf der Druckseite egalisierten sich.

Buche 6 stellte einen Sonderfall der untersuchten Säbelbäume dar, weil sich deren Stamm oberhalb des Meßbereiches wieder vertikal über dem Stammfuß befand. Auf der Druckseite und Zugseite der Biegung lagen im unteren Bereich der Krümmung erhöhte radiale Biegefestigkeiten vor, welche sich mit Ausnahme der niedrigeren Werte entlang des Markstranges im gesamten Meßbereich auf einem hohen Niveau bewegten. Auf der Druckseite fanden sich auch hier hohe Druckfestigkeiten, besonders im unteren Bereich der Krümmung. Die Festigkeitsrelationen waren somit auf der Zugseite durchweg hoch, da dort wiederum keine hohen Druckfestigkeiten vonnöten waren und lediglich die radialen Biegefestigkeiten aufgrund der wirkenden Querspannungen erhöht wurden.

Aufgrund der Einzelbetrachtung der Meßwerte der radialen Biegefestigkeit dargestellt über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) in einem xy-Diagramm, bestätigten sich die zuvor getroffenen Aussagen. Bei den schwach gekrümmten Buchen 4 und 5 lagen beide Festigkeiten oberhalb des Markstranges auf einem niedrigen Niveau, unterhalb auf einem hohen Niveau. Bei den stärker gekrümmten Buchen 1, 2 und 6 gilt zunächst das gleiche. Es waren nun aber auch hohe radiale Biegefestigkeiten mit zugehörigen niedrigen bzw. nicht erhöhten Druckfestigkeiten vorzufinden. Diese Meßwerte stammten von den lokalen Biegefestigkeitserhöhungen auf der Zugseite der Biegung und waren aufgrund nicht entsprechend hoher Druckfestigkeiten leicht identifizierbar. Für gekrümmte Buchen läßt sich bezüglich ihrer Festigkeitsverteilungen demnach folgendes zusammenfassen:

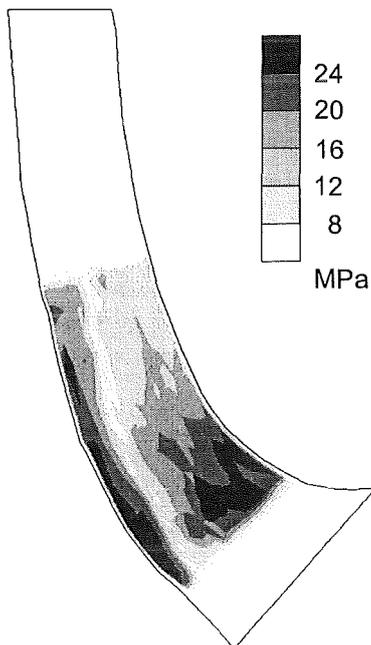
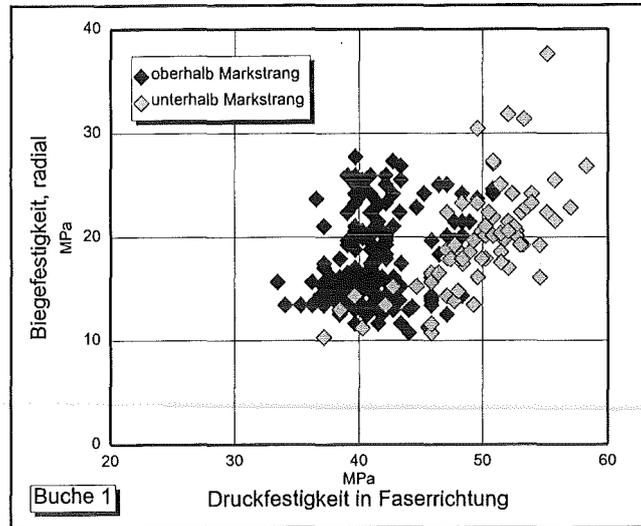
- Auf der Druckseite der Biegung waren die radialen Biegefestigkeiten und die Druckfestigkeiten in Faserrichtung deutlich erhöht.
- Die tangentialen Biegefestigkeiten und die Wachstumsspannungen in Umfangsrichtung sind auf der Druckseite der Biegung ebenfalls höher (DIETRICH, 1995).
- Auf der Zugseite der Biegung waren die radialen Biegefestigkeiten lokal erhöht, meist im Bereich der schärfsten Krümmung. Je schärfer dabei die Krümmung (je geringer der Krümmungsradius), desto ausgeprägter war die Festigkeitsüberhöhung.

Beim Übergang vom stark gekrümmten zum schwach gekrümmten oder nur noch schiefen, geraden Stamm verschwand diese Überhöhung letztlich.

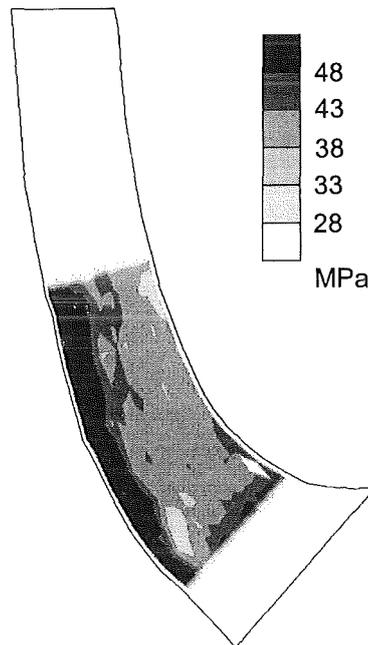
- Die Druckfestigkeiten waren auf der Zugseite der Biegung nicht erhöht, sie waren meist niedriger als bei geraden Buchen.
- Im Bereich des Markstranges lagen niedrige Biegefestigkeiten vor. Dort werden zwangsläufig tangentielle Biegefestigkeiten gemessen, die bei Laubbäumen merklich geringer sind als die radialen Biegefestigkeiten.
- Erfolgte auf der Druckseite ein Übergang von einer konvexen zu einer konkaven Krümmung mit geringem Krümmungsradius, dann verfügten diese Bäume im Bereich der konkaven Krümmung über höhere radiale Biegefestigkeiten. Dies dürfte in dort zeitweise vorherrschenden, hohen Querspannungen begründet sein.
- Die Verteilung der Festigkeitsrelationen von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung beschrieb weitgehend die Verteilung der radialen Biegefestigkeiten. Eine Ausnahme waren die Stellen, wo eine hohe Druckfestigkeit gefordert war (sich also beide Festigkeiten erhöhten).



Buche 1
(*Fagus sylvatica* L.)



Radiale Biegefestigkeit



Druckfestigkeit in Faserrichtung

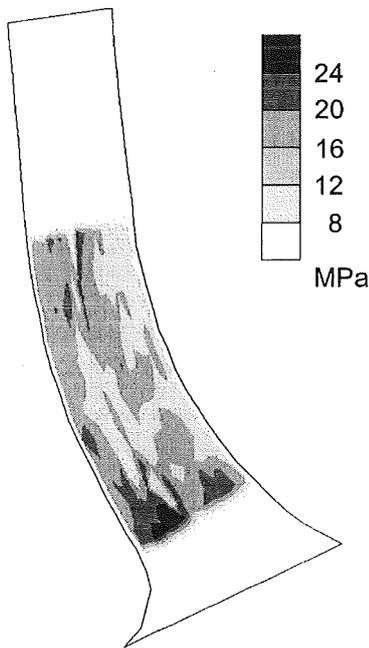
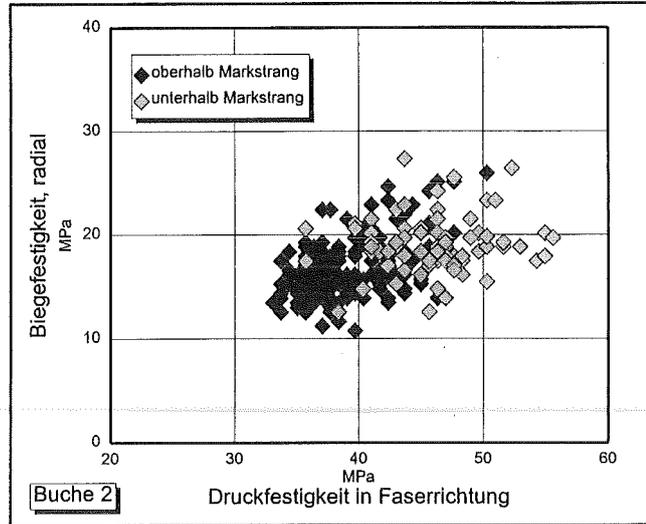


Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung

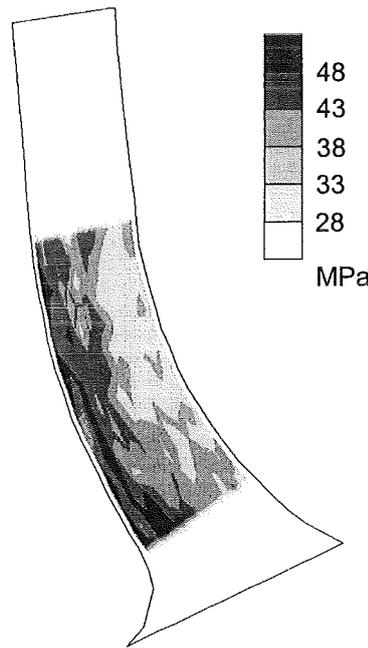
Abbildung 3.36: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Buche 1.



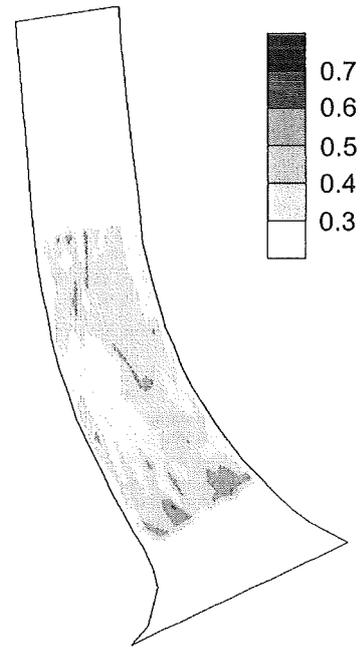
Buche 2 (*Fagus sylvatica* L.)



Radiale Biegefestigkeit

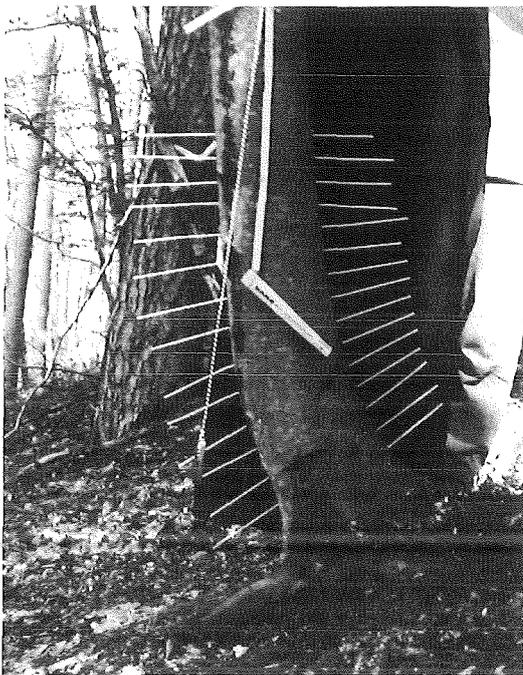


Druckfestigkeit in Faserrichtung

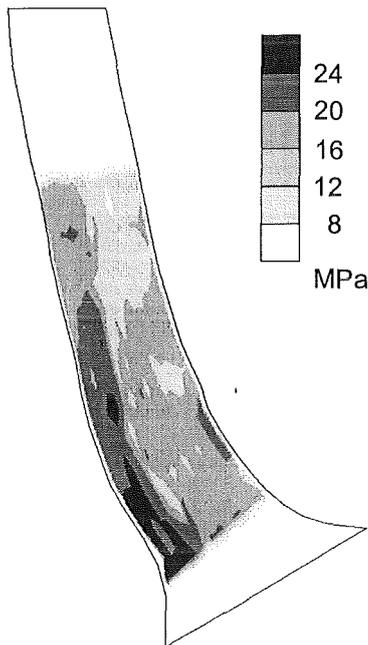
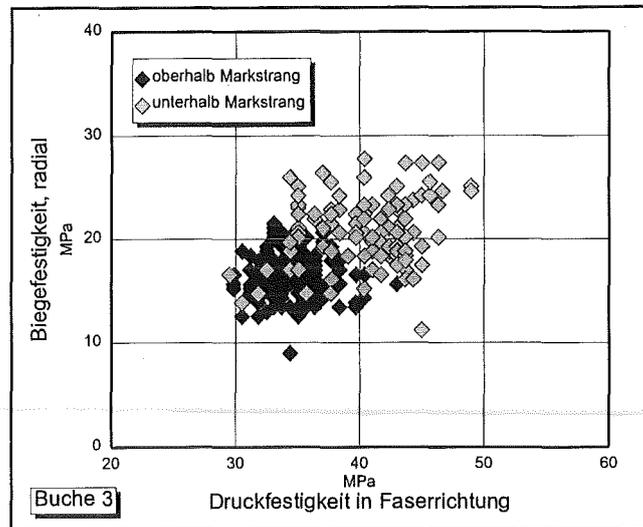


Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung

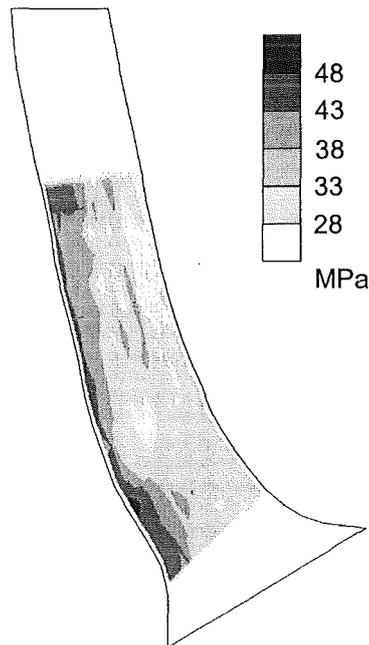
Abbildung 3.37: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Buche 2.



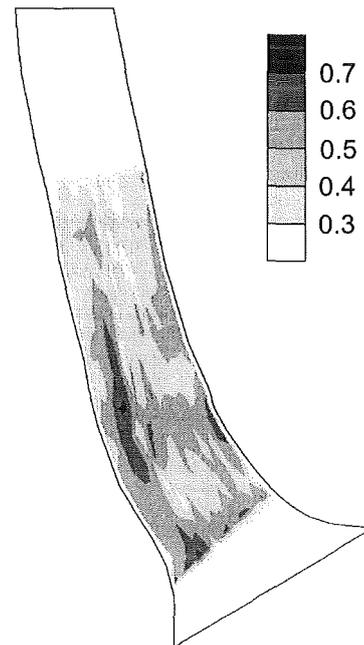
Buche 3
(*Fagus sylvatica* L.)



Radiale Biegefestigkeit



Druckfestigkeit in Faserrichtung

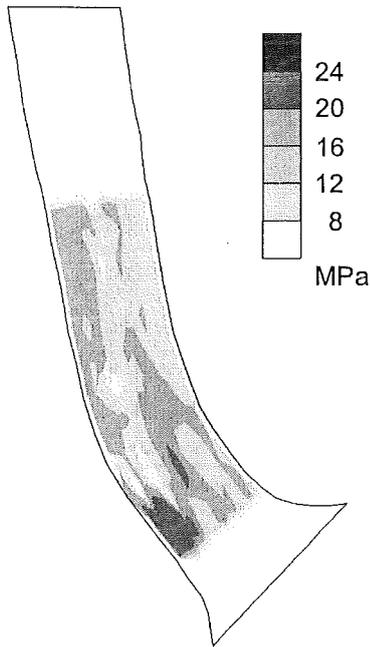
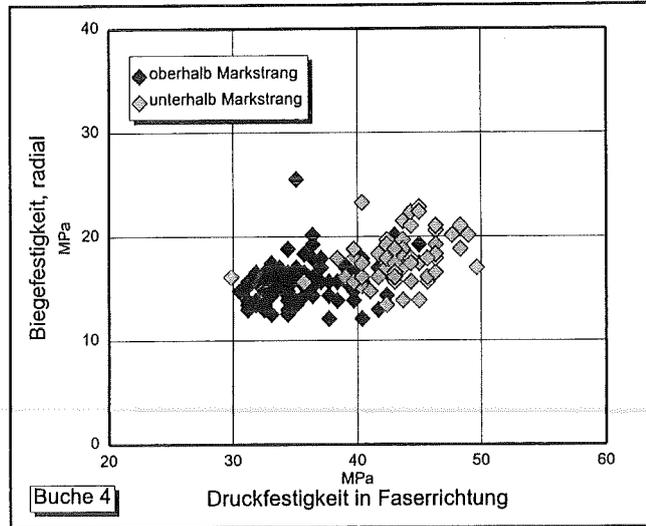


Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung

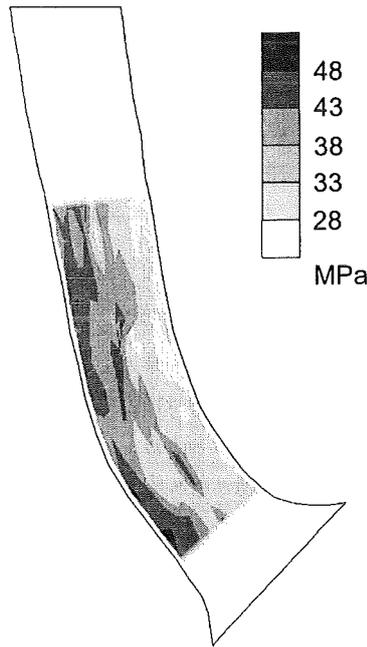
Abbildung 3.38: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Buche 3.



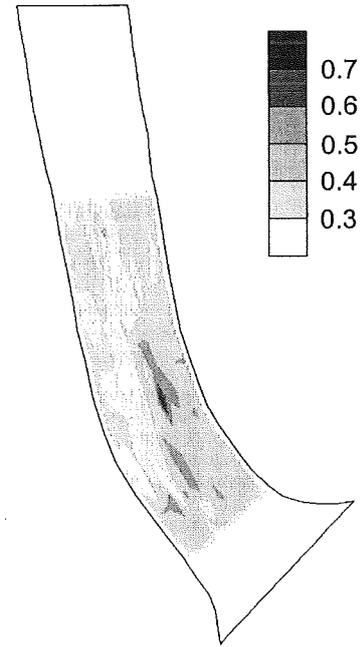
Buche 4
(*Fagus sylvatica* L.)



Radiale Biegefestigkeit



Druckfestigkeit in Faserrichtung

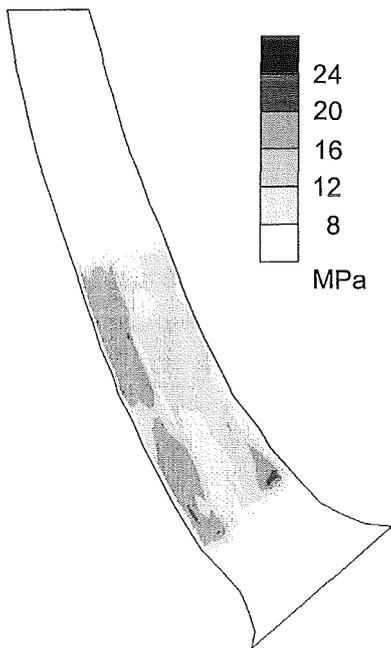
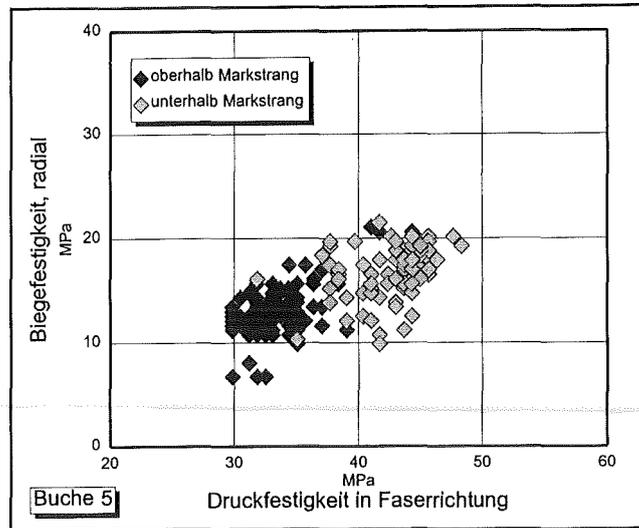


Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung

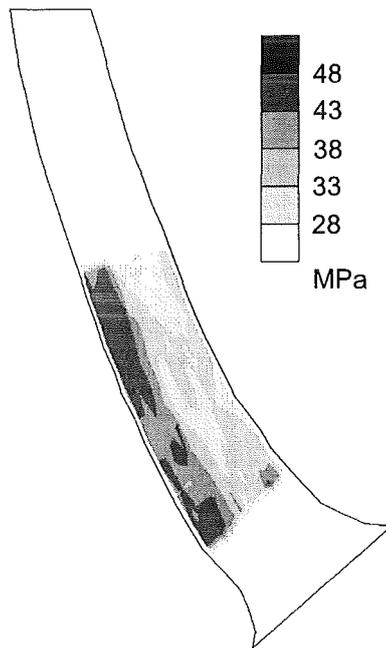
Abbildung 3.39: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Buche 4.



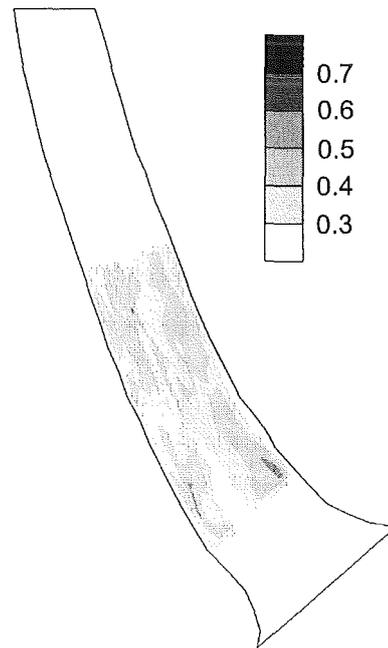
Buche 5
(*Fagus sylvatica* L.)



Radiale Biegefestigkeit



Druckfestigkeit in Faserrichtung

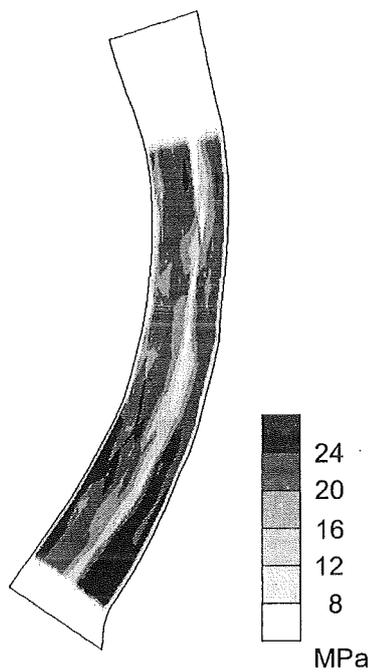
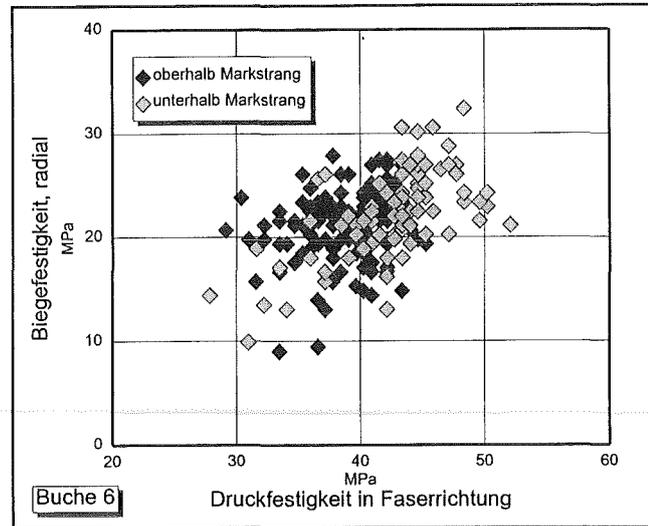


Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung

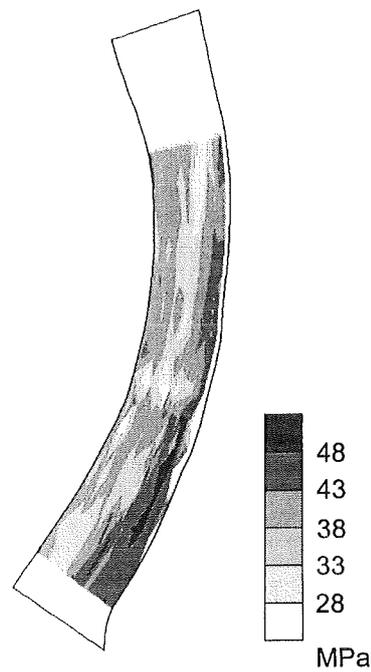
Abbildung 3.40: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Buche 5.



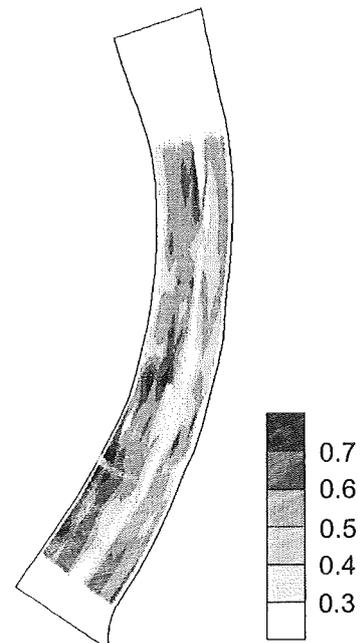
Buche 6
(*Fagus sylvatica* L.)



Radiale Biegefestigkeit



Druckfestigkeit in Faserrichtung



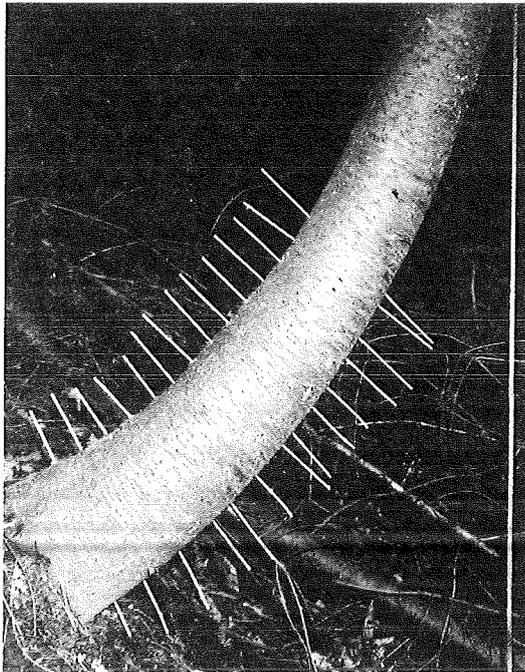
Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.41: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Buche 6.

Douglasie 1 besaß auf der Druckseite der Biegung hohe Druckfestigkeiten, insbesondere in einem Streifen der direkt dem Markstrang in Richtung zur konvexen Seite hin folgte. Auf der Zugseite wurden Werte wie bei geraden Douglasien gemessen. Die radialen Biegefestigkeiten waren im unteren Meßbereich auf beiden Seiten des Markstranges erhöht. Es war auch hier ein Streifen hoher radialer Biegefestigkeiten zu erkennen, der direkt dem Markstrang zur konvexen Seite hin folgte. Die Verteilung der Festigkeitsrelationen spiegelte im wesentlichen die erhöhten Werte der radialen Biegefestigkeiten im unteren Meßbereich wieder.

Für **Douglasie 2** galt bzgl. der Druckfestigkeiten das zu Douglasie 1 Gesagte gleichermaßen. Auf der Druckseite der Biegung waren diese wiederum hoch, insbesondere in einem Streifen der direkt dem Markstrang in Richtung zur konvexen Seite hin folgte. Auf der Zugseite wurden Werte wie bei geraden Douglasien gemessen. Die radialen Biegefestigkeiten waren erneut in einem Streifen, der direkt dem Markstrang zur konvexen Seite hin folgte, erhöht. Ein weiterer, nicht ganz so ausgeprägter Streifen hoher radialer Biegefestigkeiten war auf der Zugseite von unten bis zur Mitte des Meßbereiches vorhanden. Die Verteilung der Festigkeitsrelationen wies im Bereich der schärfsten Krümmung der Zugseite hohe Werte auf.

Prinzipiell verhielten sich also gekrümmte Douglasien als Vertreter der Nadelbäume bzgl. der untersuchten Festigkeitsverteilungen wie gekrümmte Buchen. Unterschiede gab es lediglich auf der Druckseite der Biegung, wo die Festigkeiten in einem Streifen, der direkt dem Markstrang zur konvexen Seite hin nachfolgte, besonders hoch waren. Die Ursache hierfür könnte darin liegen, daß durch die Krümmung die neutrale Faser der Biegung in Richtung der konkaven Seite verschoben wird. Im Gegensatz zu Laubbäumen, die dort Zugholz bilden, lagern Nadelbäume jedoch auf ihrer Unterseite Druckholz an. Neutrale Faser und Markstrang befinden sich dadurch nahezu an der gleichen Stelle. Der Streifen hoher Festigkeiten könnte diesem erhöhten Gefahrenpotential somit entgegenwirken. Es könnte aber auch sein, daß Nadelbäume einer Schiefstellung zunächst mit extrem guten Festigkeitseigenschaften entgegentreten, um diese wegen des enormen Energieaufwandes später wieder reduzieren zu können. Desweiteren war der Bereich des Markstranges weniger deutlich sichtbar, da bei Nadelbäumen zum einen die Unterschiede zwischen tangentialer und radialer Biegefestigkeit gering sind (vgl. Kap. 3.2), zum anderen eventuell die Werte im Markbereich hier auch wegen der oben dargelegten Problematik der Verschiebung der neutralen Faser erhöht waren. Hierdurch würden auch die zugleich hohen Druckfestigkeiten erklärt. Ein weiterer Unterschied zu den gekrümmten Buchen wird nochmals bei der Betrachtung der xy-Diagramme deutlich. Es sind dort die Meßwerte der radialen Biegefestigkeit über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung aufgetragen. Es waren zwar die gleichen Effekte wie bei den Buchen zu finden, z.B. oberhalb des Markstranges trotz niedriger Druckfestigkeiten hohe Biegefestigkeiten oder eine Erhöhung beider Festigkeiten unterhalb des Markstranges, zusätzlich gab es aber auch Stellen hoher Druckfestigkeiten bei gleichzeitig niedrigen Biegefestigkeiten unterhalb des Markstranges. Diese Stellen befanden sich hauptsächlich im äußeren Bereich der Druckseite.



Douglasie 1
(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco)

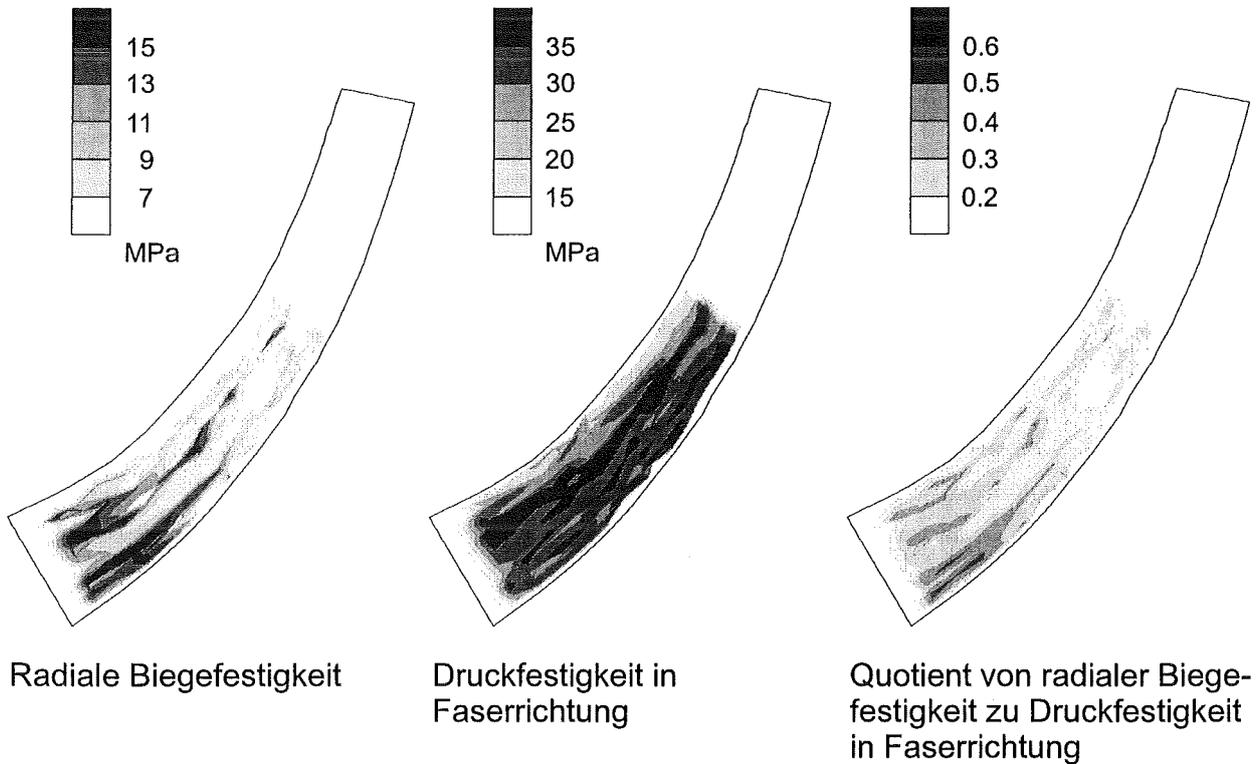
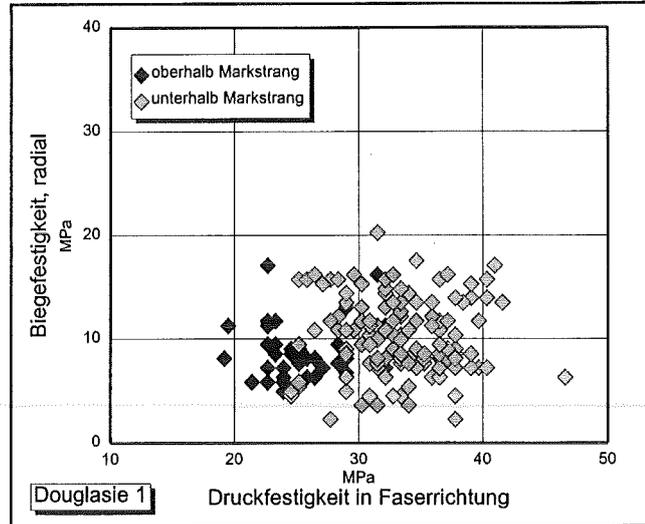
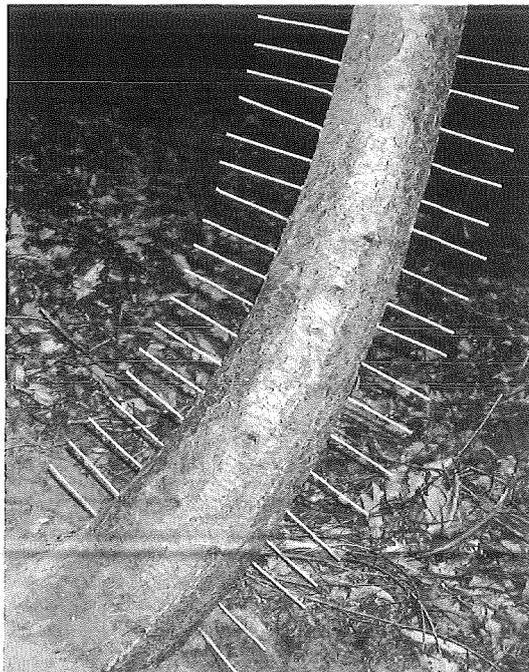


Abbildung 3.42: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Douglasie 1.



Douglasie 2
(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco)

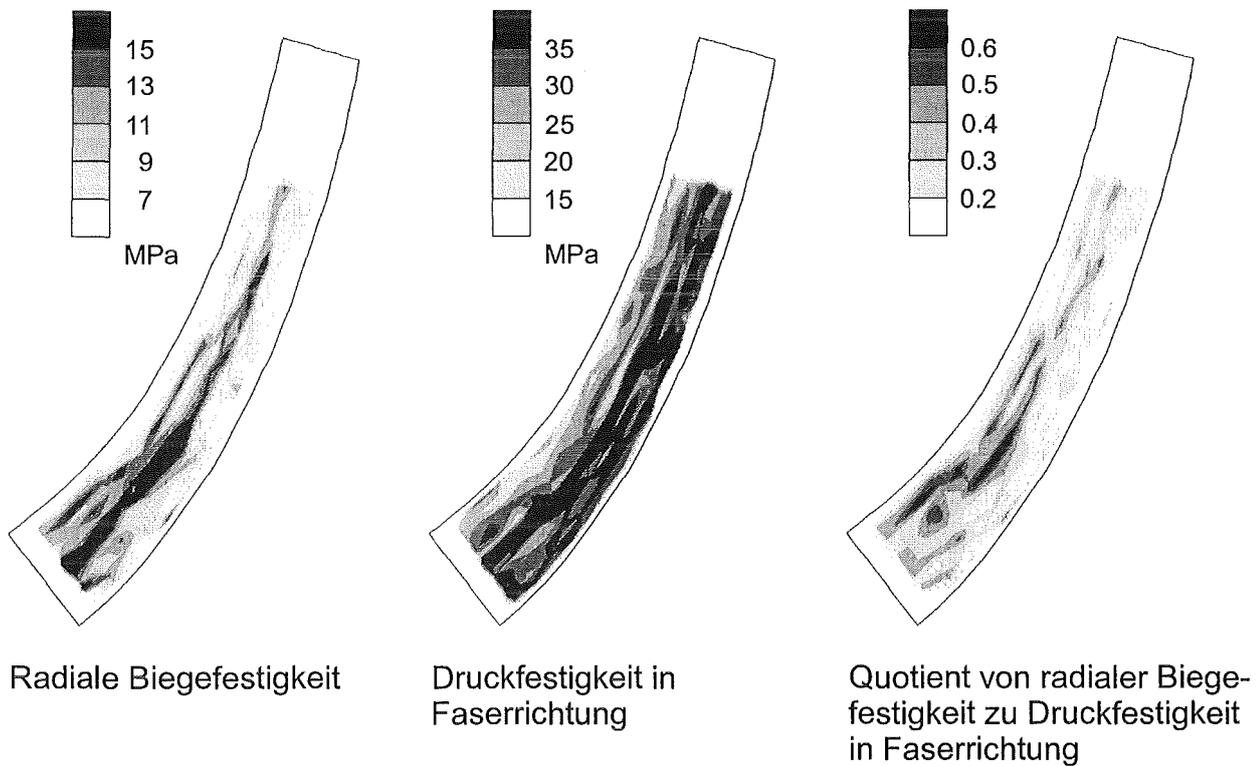
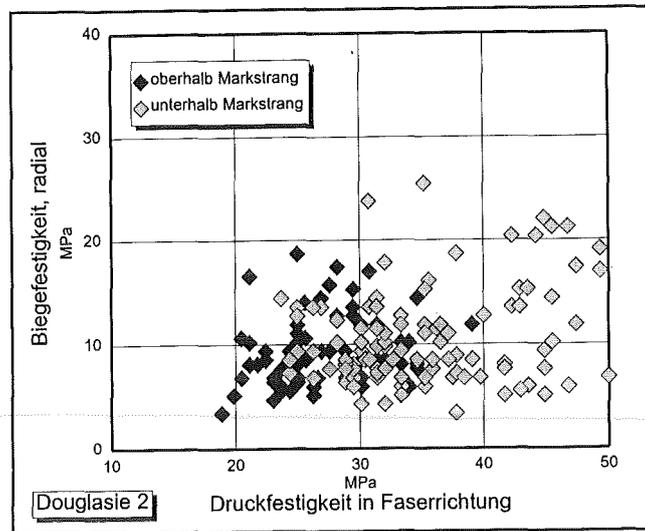
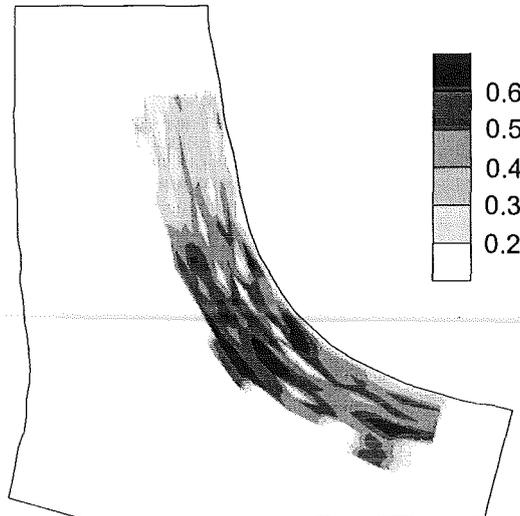
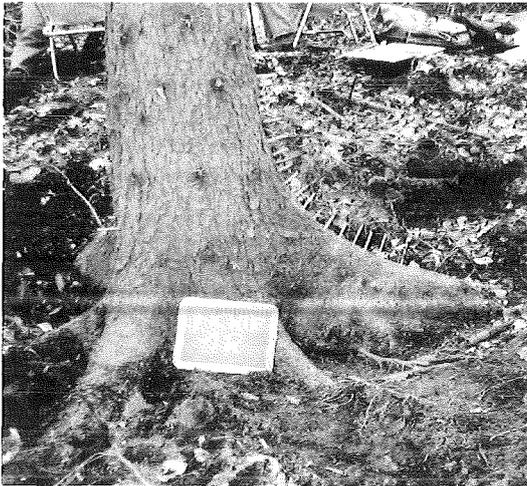


Abbildung 3.43: Bohrkernentnahmestellen und Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung (aufgeteilt in Werte ober- und unterhalb des Markstranges) sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen von Douglasie 2.

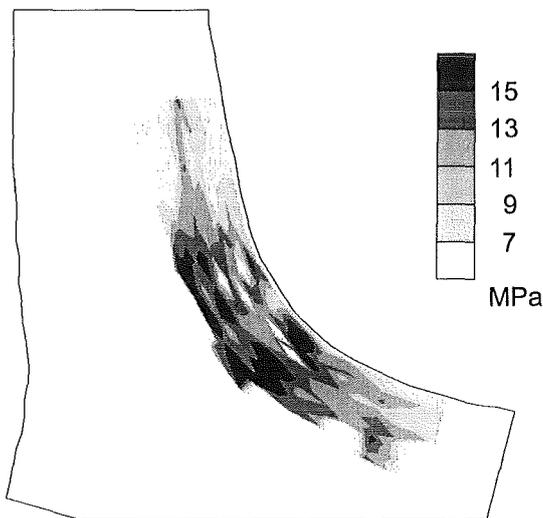
Die Festigkeitsverteilungen der Wurzelanläufe der **Fichten 1-6** ähnelten sich prinzipiell. In den Abbildungen 3.44 bis 3.49 sind jeweils ein Foto mit den Bohrkernentnahmestellen, die Verteilung der radialen Biegefestigkeiten und der Druckfestigkeiten in Faserrichtung sowie deren Relation zueinander als Graustufenflächen dargestellt. Abbildung 3.50 enthält die Meßwerte der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung jeweils in einem xy-Diagramm pro Fichte. Die Druckfestigkeiten in Faserrichtung im Bereich der Krümmung entsprachen etwa denen im geraden Stammabschnitt. Die Druckfestigkeiten waren jedoch durchschnittlich um 25 % geringer als die bei geraden Fichten ermittelten Werte in 0,5 m bis 1,5 m Höhe. Die radialen Biegefestigkeiten waren fast ausnahmslos im Bereich der schärfsten Krümmung am höchsten, sie übertrafen dort die im geraden Stammabschnitt gemessenen radialen Biegefestigkeiten um das bis zu dreifache. Die Verteilung der Festigkeitsrelationen spiegelte im wesentlichen die erhöhten Werte der radialen Biegefestigkeiten im Bereich der Krümmung wieder. Im geraden Stammabschnitt der untersuchten Wurzelanläufe lagen diese auf dem Niveau der bei geraden Fichten ermittelten Verhältnisse in 0,5 m bis 1,5 m Höhe. Die Betrachtung der xy-Diagramme¹⁴ verdeutlichen die Unterschiede zu den bei geraden Fichten ermittelten Festigkeiten in 0,5 m bis 1,5 m Höhe (vgl. Abb. 3.23). Dort sind die Meßwerte der radialen Biegefestigkeit über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung aufgetragen. Die radialen Biegefestigkeiten lagen mit nur wenigen Ausnahmen immer unter 10 MPa, dagegen die Druckfestigkeiten in Faserrichtung zwischen 20 und 40 MPa. Die Verteilung der beiden Festigkeiten scheint demnach auch bei den untersuchten Wurzelanläufen von Fichten optimal an die gestellten Anforderungen angepaßt zu sein. Im Bereich der schärfsten Krümmung entstanden Querspannungen in radialer Richtung, denen die Fichten mit hohen, radialen Biegefestigkeiten entgegenwirkten. Im gesamten äußeren Stamm- und Wurzelbereich (Meßbereich) lagen in Faserrichtung Zugspannungen vor. Dementsprechend waren die Druckfestigkeiten in Faserrichtung sogar geringer als in geraden Bäumen ohne einseitige Belastung durch Wind oder Schiefstand. Die Festigkeiten wurden also auch hier eindeutig last- und richtungsabhängig verteilt.

¹⁴Bei den Fichten 2 bis 5 wurden die radialen Biegefestigkeiten mit dem Fractometer I ermittelt, weshalb bei allen Meßwerten unter 10 MPa aufgrund der Vorspannung der Spiralfeder keine exakten Werte angebar waren und deshalb weggelassen wurden.

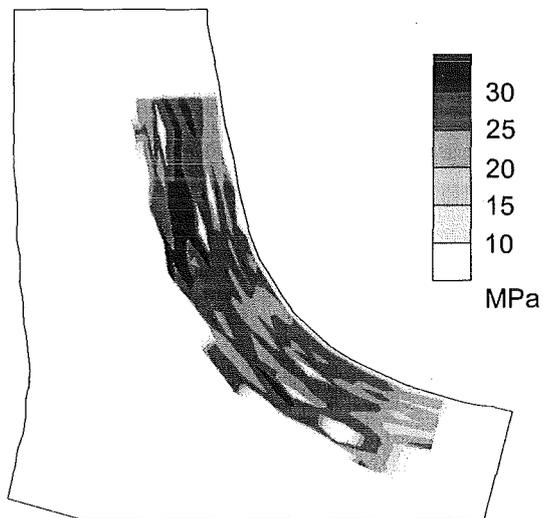
**Fichte 1
(*Picea abies* (L.) Karst.)**



Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung



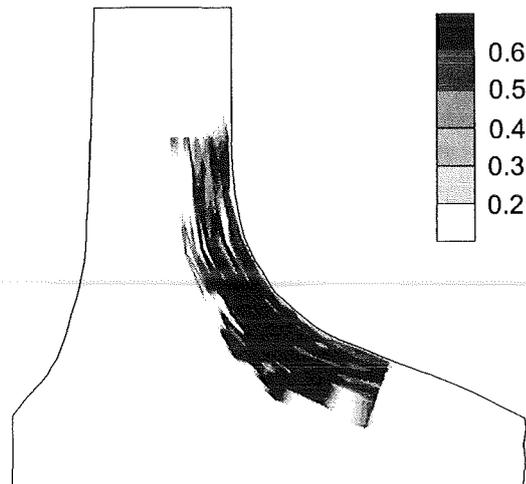
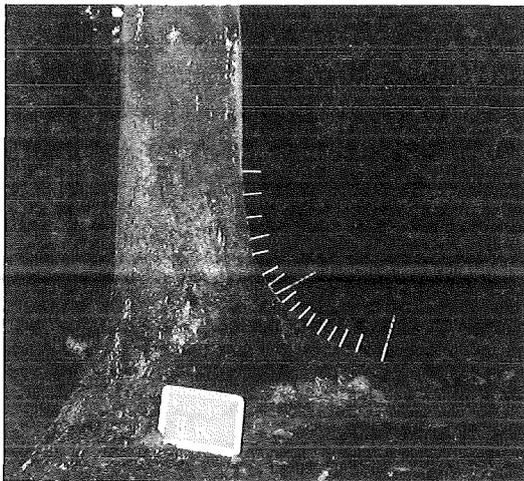
Radiale Biegefestigkeit



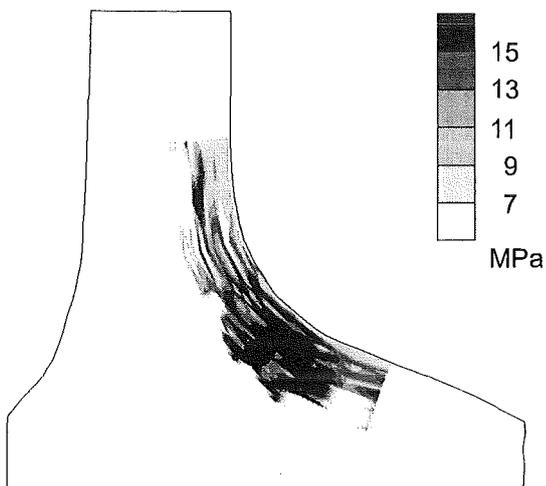
Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.44: Bohrkernentnahmestellen sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen des Wurzelanlaufes von Fichte 1.

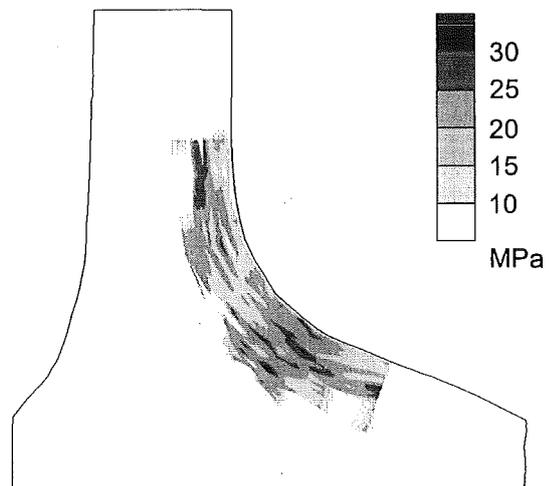
Fichte 2
(*Picea abies* (L.) Karst.)



Quotient von radialer Biege-
festigkeit zu Druckfestigkeit
in Faserrichtung



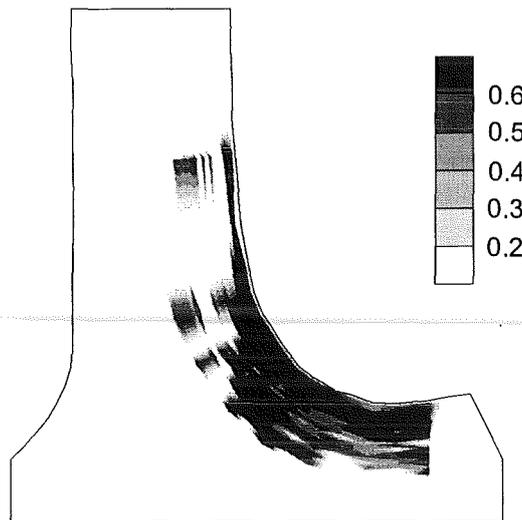
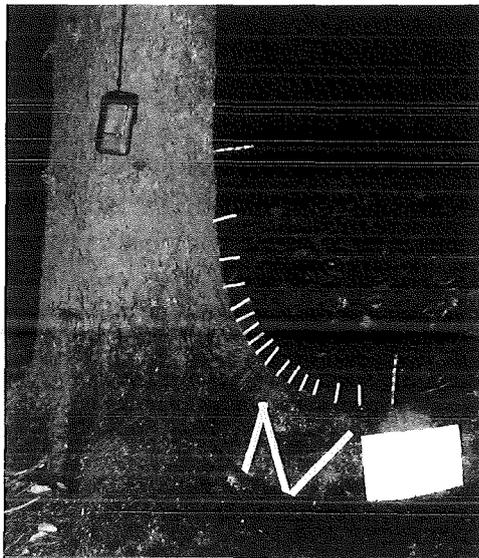
Radiale Biegefestigkeit



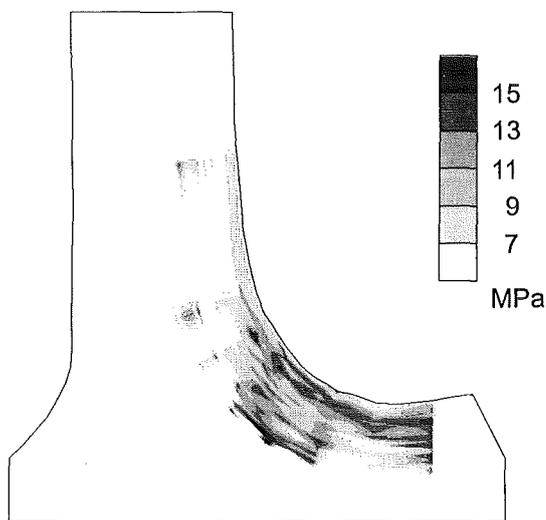
Druckfestigkeit in
Faserrichtung

Abbildung 3.45: Bohrkernentnahmestellen sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen des Wurzelanlaufes von Fichte 2.

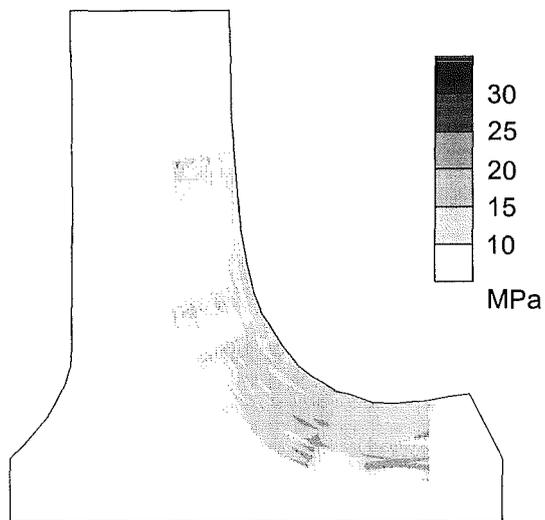
**Fichte 3
(*Picea abies* (L.) Karst.)**



Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung



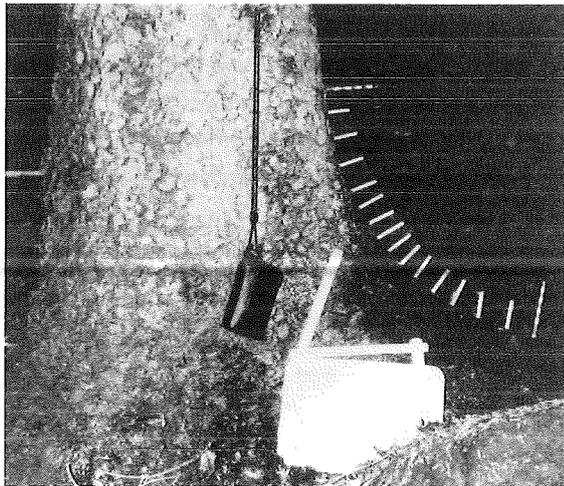
Radiale Biegefestigkeit



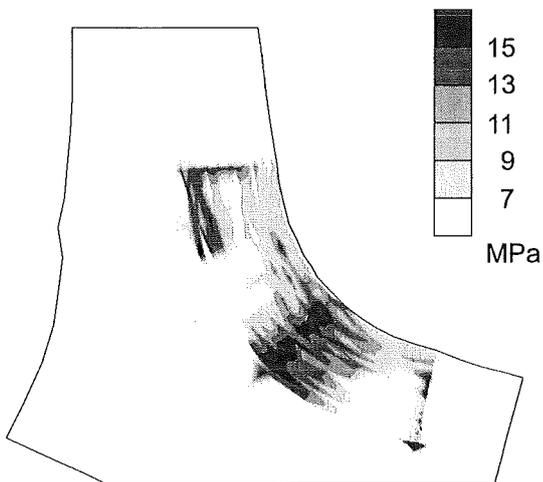
Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.46: Bohrkernentnahmestellen sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen des Wurzelanlaufes von Fichte 3.

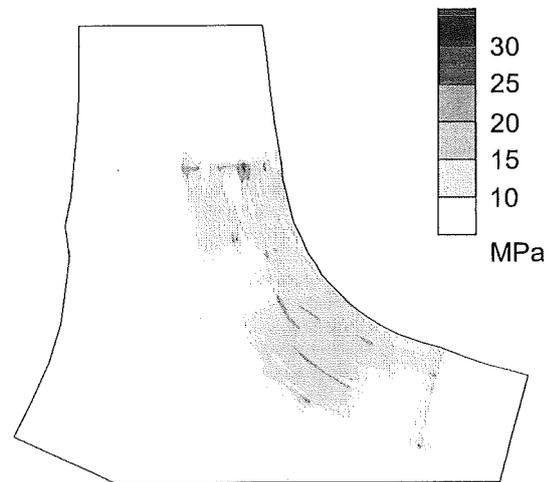
Fichte 4
(*Picea abies* (L.) Karst.)



Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung



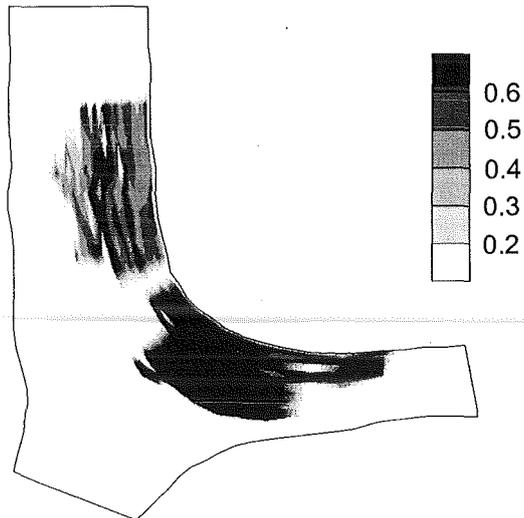
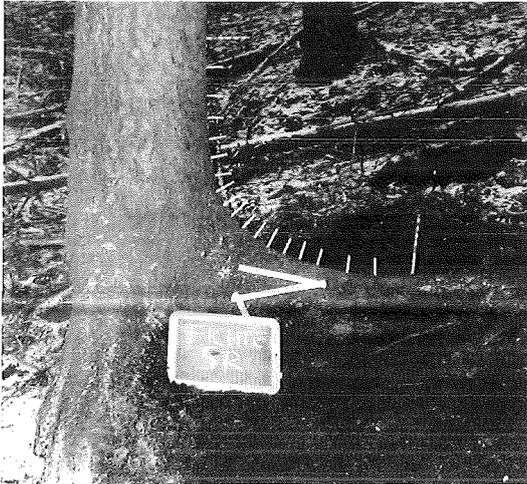
Radiale Biegefestigkeit



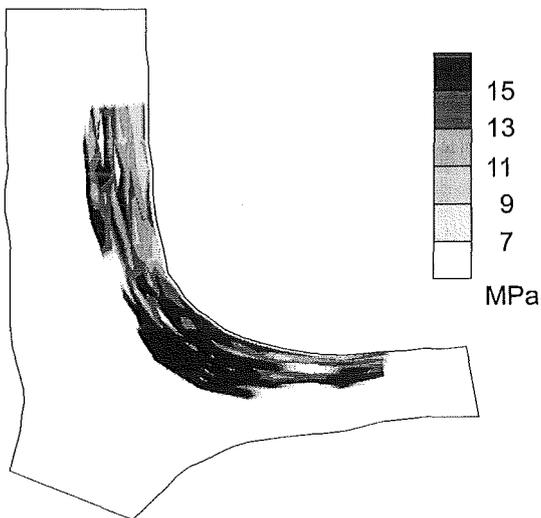
Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.47: Bohrkernentnahmestellen sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen des Wurzelanlaufes von Fichte 4.

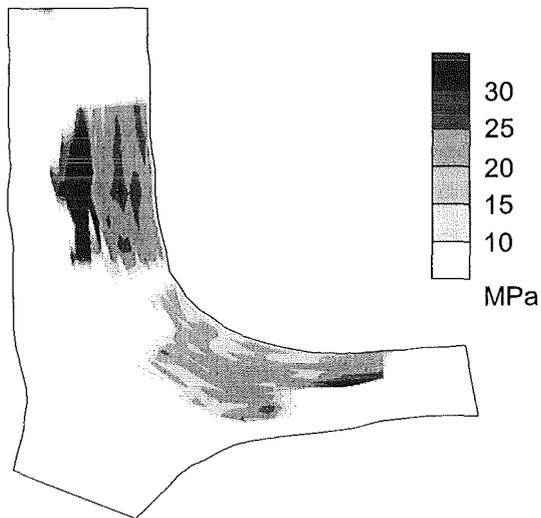
**Fichte 5
(Picea abies (L.) Karst.)**



Quotient von radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung



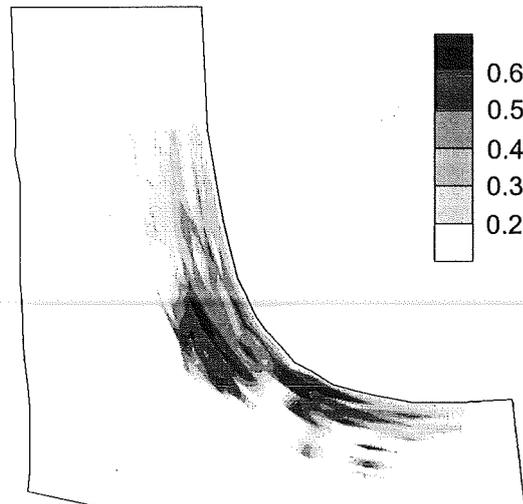
Radiale Biegefestigkeit



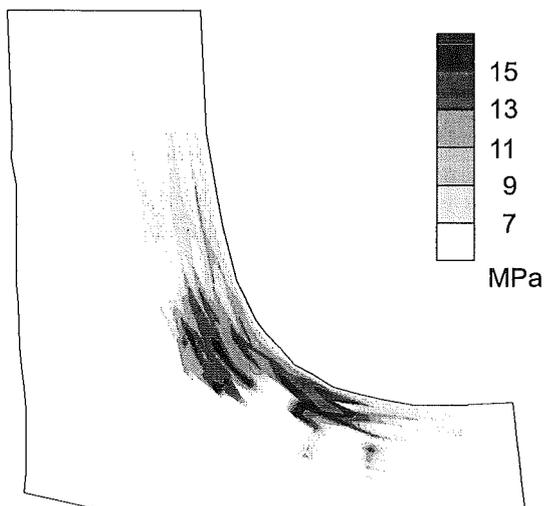
Druckfestigkeit in Faserrichtung

Abbildung 3.48: Bohrkernentnahmestellen sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen des Wurzelanlaufes von Fichte 5.

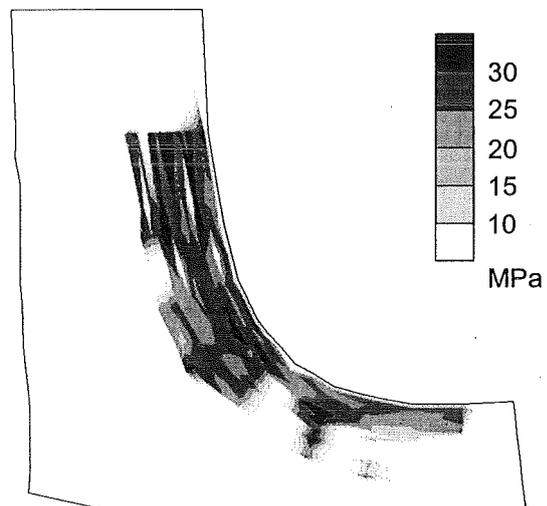
Fichte 6
(*Picea abies* (L.) Karst.)



Quotient von radialer Biege-
festigkeit zu Druckfestigkeit
in Faserrichtung



Radiale Biegefestigkeit



Druckfestigkeit in
Faserrichtung

Abbildung 3.49: Bohrkernentnahmestellen sowie die Verteilung der beiden gemessenen Festigkeiten und deren Relationen zueinander als Graustufenflächen des Wurzelanlaufes von Fichte 6.

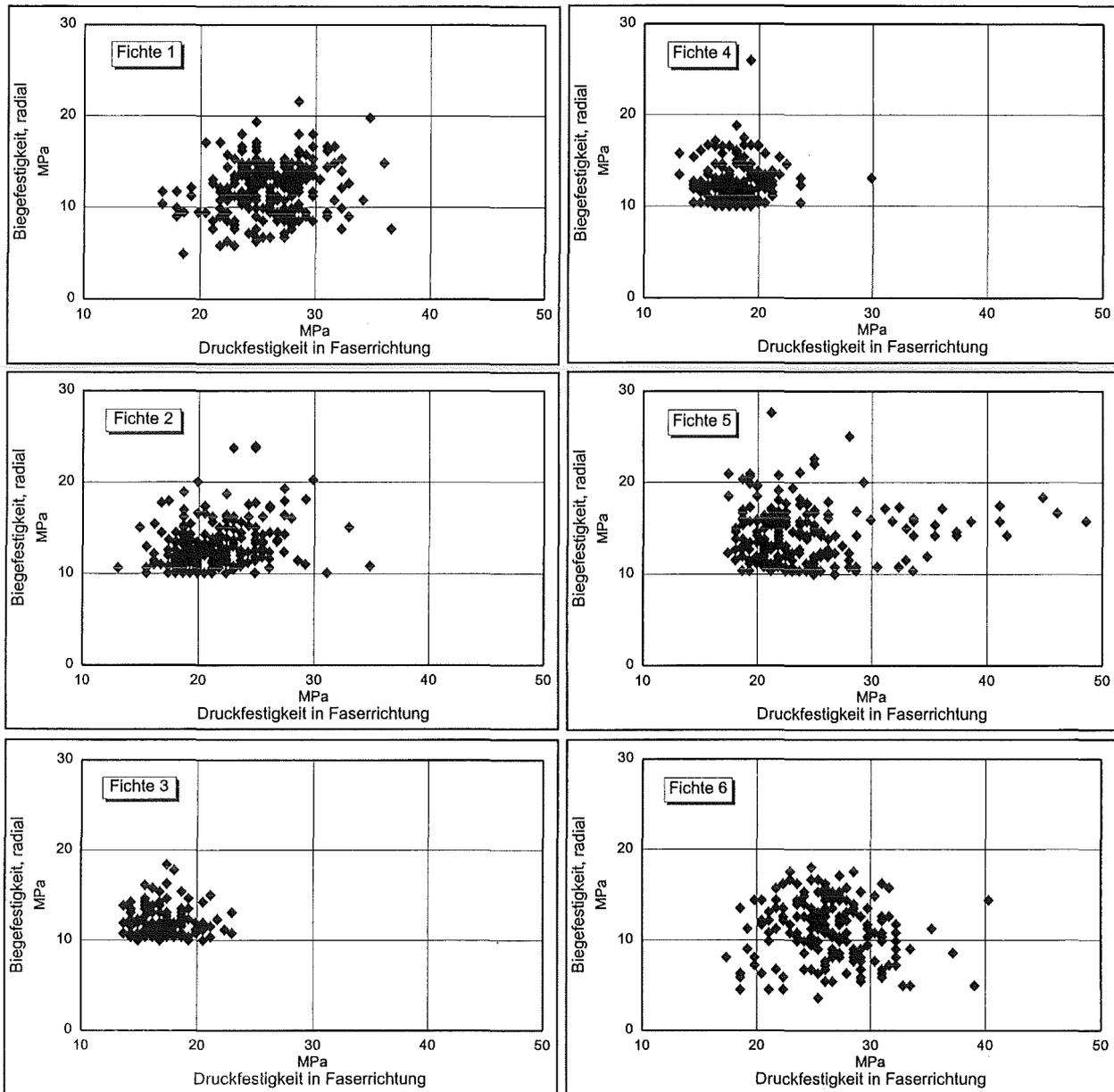


Abbildung 3.50: Diagramme mit den Meßwerten der radialen Biegefestigkeit aufgetragen über der zugehörigen Druckfestigkeit in Faserrichtung aller untersuchten Fichten.

3.5 Festigkeitsverteilungen in windexponierten Bäumen

Im Rahmen einer Feldstudie in der Nähe von Edinburgh (Schottland) wurde untersucht, inwieweit windexponierte, gerade oder schiefe Buchen (*Fagus sylvatica* L.) ihre Festigkeiten lastgerecht verteilen (ZIPSE et al., 1996b). Die untersuchten Bäume waren aufgrund ihrer windexponierten Lage auf einer Bergkuppe vorwiegend einseitiger Windbelastung ausgesetzt. Diese Windbelastung hat bei den Bäumen bereits ihre Spuren hinterlassen, denn es fanden sich viele ellipsenförmige Astquerschnitte mit einer horizontalen Ausrichtung der längeren Achse sowie vom Wind freigelegte Wurzeln vor. Die ovale Form der Querschnitte stellt eine Reaktion der Bäume auf eine überwiegende Biegebelastung in einer Ebene dar. Nach dem Axiom der konstanten Spannung wird dort von Bäumen wegen der wirkenden Biegespannungen mehr Material angelagert, um diese durch ein erhöhtes Flächenträgheitsmoment zu reduzieren und damit dem Versagen vorzubeugen. In Abbildung 3.51 sind einige der auf einer Bergkuppe stehenden, untersuchten Buchen dargestellt.



Abbildung 3.51: Ort der Untersuchungen an windexponierten und teilweise schiefen Buchen (*Fagus sylvatica* L.) in der Nähe von Edinburgh (Schottland). Deutlich zu erkennen sind die durch einseitige Windbelastung gestalteten Baumkronen.

Die Belastungssituation war somit trivial, auf der Leeseite lagen in Faserrichtung Druckspannungen vor, auf der Luvseite hingegen Zugspannungen. Bei den schiefen Buchen traten zusätzlich zur Windbelastung in Richtung der Neigung gleichgerichtete Spannungen aufgrund des Eigengewichts von Stamm und Krone in Erscheinung. Jedem der untersuchten Bäume wurde auf der Lee- bzw. Luvseite in ca. 1 m Höhe je ein Bohrkern in radialer Richtung entnommen und inkrementweise die radiale Biegefestigkeit und die Druckfestigkeit in Faserrichtung gemessen.

In Abbildung 3.52 sind für alle Bäume die Verhältnisse des Mittelwertes der Lee- zur Luvseite für die radiale Biegefestigkeit und die Druckfestigkeit in Faserrichtung dargestellt. Die Neigung der einzelnen Bäume zur Lotrechten in Grad ist als Datenbeschriftung den Verhältnissen zur Seite gestellt. Bei fast allen Bäumen waren die Festigkeiten auf der Leeseite höher als auf der Luvseite, d.h. die Verhältnisse größer als 1. Bei den Bäumen die nicht geneigt waren (0°) betrug die Erhöhung der Festigkeiten auf der Leeseite gegenüber der Luvseite maximal 10%. Bei schiefen Bäumen wurde teilweise eine Erhöhung um bis zu 40% ermittelt. Es war also deutlich eine lastabhängige Verteilung der Festigkeiten festzustellen, wobei die Bäume besonders auf eine Schiefstellung durch eine Erhöhung der Festigkeiten auf der Druckseite der Gefahr des Faserknickens vorzubeugen schienen. Eine richtungsabhängige Verteilung der Festigkeiten war hier aufgrund der untersuchten Festigkeitskenngrößen und der Orte der Probenentnahme nicht zu erwarten, da es sich bei den untersuchten Bäumen nicht um gekrümmte oder hohle Bäume handelte und deswegen keine Querkzugbelastungen vorlagen. Es waren lediglich Druckbelastungen parallel zur Stammachse vorhanden, auf die Bäume in der Regel mit einer Erhöhung der Biegefestigkeit quer zur Faser und der Druckfestigkeit in Faserrichtung reagieren (vgl. Kap. 3.4). Dies hat beispielsweise für die Holzindustrie zur Folge, daß diese Bäume senkrecht zur Windbelastung bzw. Schiefstellung zersägt werden sollten, um eine möglichst homogene Materialqualität zu erhalten. Für den Baumsachverständigen sind schiefe Bäume, deren Festigkeiten auf der Druckseite deutlich erhöht sind weniger versagensgefährdet im Vergleich zu schiefen Bäumen ohne eine derartige lastabhängige Festigkeitsanpassung.

Der Einfluß der Zugspannungen in Faserrichtung auf der Luvseite sowie der Schubspannungen in der neutralen Faser der Biegung auf die entsprechenden Festigkeitskenngrößen wurde hier nicht untersucht.

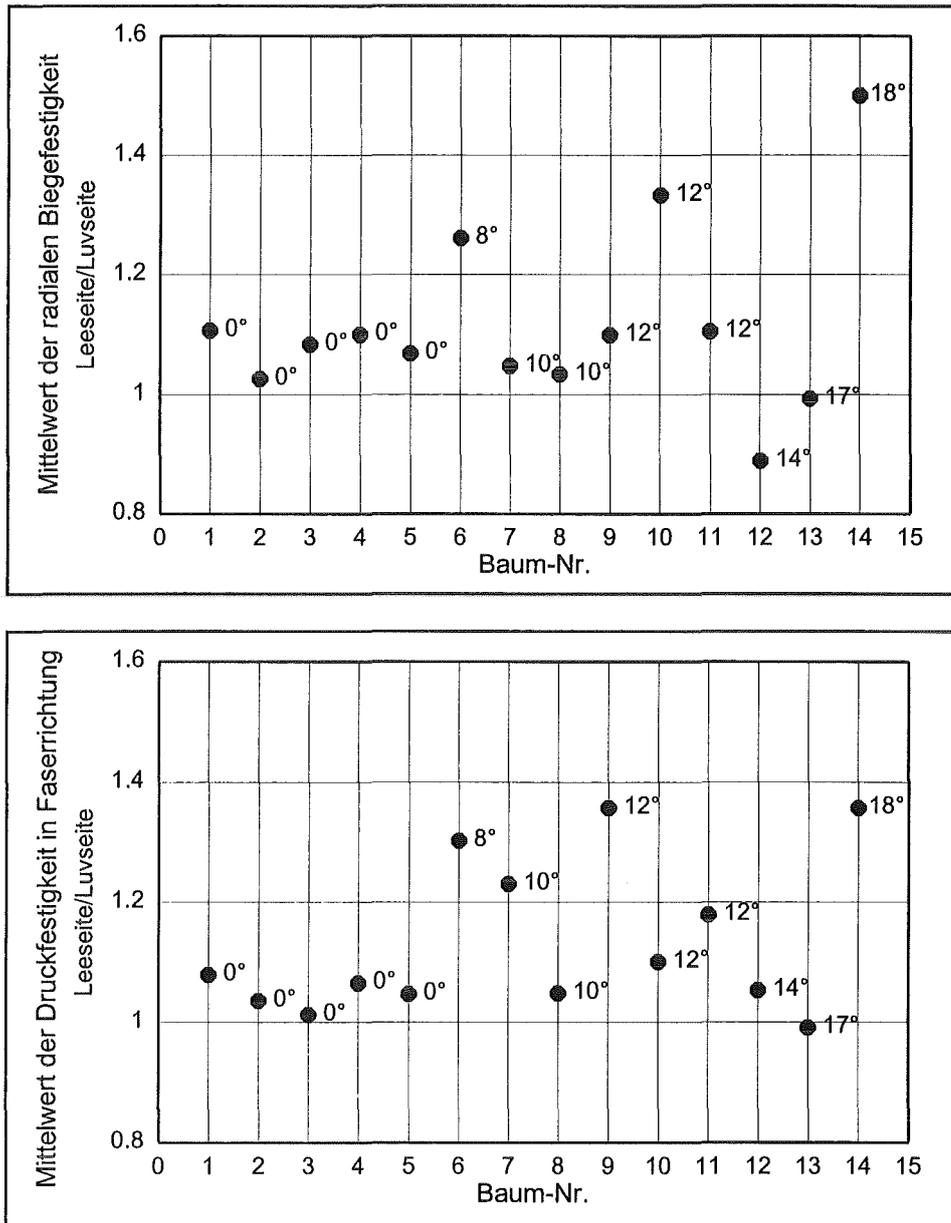


Abbildung 3.52: Verhältnisse der Mittelwerte von Lee- zu Luvseite der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung windexponierter schottischer Buchen (*Fagus sylvatica* L.). Die Zahlenangaben stellen jeweils die Neigung zur Lotrechten dar.

3.6 Festigkeitsverteilungen in hohlen Bäumen

Hohle Bäume sind in den verschiedensten Ausprägungen anzutreffen und jeder einzelne stellt bezüglich der wirkenden Belastungen und seiner Geometrie einen mechanischen Einzelfall dar. Das Risiko des mechanischen Versagens kann so unterschiedlich sein wie die Entstehung solcher hohlen Bäume, wie z.B. durch Feuer oder Pilzbefall. Die Erhöhung der Biegespannungen im Restquerschnitt aufgrund einer Aushöhlung des Stammes wird von Bäumen im Normalfall durch ein verstärktes Dickenwachstum (Erhöhung des Widerstandsmomentes) entsprechend dem Axiom konstanter Spannung entgegengetreten. Dieses läßt dann als äußeres Merkmal (Symptom) auf einen hohlen Bereich (Defekt) schließen. Oft wird dabei sogar das vor der Aushöhlung vorliegende Widerstandsmoment übertroffen. Betrachtet man zudem beispielsweise die auf Biegung belasteten, dickwandigen Röhrenknochen von Menschen, die in besonderem Maße den Prinzipien des Leichtbaus genügen müssen, scheint eine Aushöhlung von Bäumen nicht gerade eine ernstzunehmende Versagensgefahr darzustellen. In den Wäldern Tasmaniens (Australien) findet man ältere Bäume fast ausschließlich mit geöffneten Aushöhlungen, die durch die regelmäßig wiederkehrenden Waldbrände entstehen. Der Vorteil eines Knochens ist jedoch, daß dieser im Gegensatz zu Bäumen auch in seinem Inneren Material anlagern oder entfernen kann, um im zeitlichen Mittel eine Spannungskonstanz zu erreichen. Bäume können ihre Gestalt lediglich auf der Oberfläche verändern. Je dünnwandiger nun der verbleibende, gesunde Restquerschnitt wird, desto größer wird die Gefahr des Beulversagens. Das Versagen durch Beulen ist deshalb so gefährlich, weil es ein instabiles Versagen darstellt und ohne jegliche Vorwarnung eintreten kann. MATTHECK und Mitarbeiter untersuchten daher weltweit über 900 hohle Bäume unterschiedlichster Art und Größe (MATTHECK und BRELOER, 1994; MATTHECK et al., 1994b). Es stellte sich heraus, daß bei gebrochenen Bäumen das Verhältnis von Wandstärke t zu Radius r meist zwischen $t/r = 0,2$ und $0,3$ lag und kaum Bäume mit einem t/r -Verhältnis weit über $0,3$ gebrochen waren. Das t/r -Kriterium wurde deshalb gewählt, weil hohle Bäume besonders durch Beulversagen gefährdet sind und die Beulformeln eine Abhängigkeit der kritischen Beulspannung vom Verhältnis t/r aufweisen. Dieses in der Natur vorgefundene t/r -Versagenskriterium besagt also, daß Bäume mit einem geringeren t/r -Verhältnis wie $0,3$ besonders bruchgefährdet sind. Es stellt sich nun die Frage, ob hohle Bäume parallel zur äußeren Gestaltoptimierung in Form eines verstärkten Dickenwachstums auch ihre Festigkeitseigenschaften verändern, um der zusätzlichen Beulgefahr entgegenzutreten. Aufgrund der vielfältigen Erscheinungsformen hohler Bäume und der damit verbundenen unterschiedlichen Belastungsarten sind diese besonders gut geeignet eine etwaige last- und richtungsabhängige Verteilung ihrer Festigkeiten zu untersuchen. Hierzu wurden an zahlreichen hohlen Bäumen Festigkeitsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse weiter unten vorgestellt werden. MATTHECK und BRELOER (1994) haben die wesentlichen Versagensarten von Bäumen bereits ausgiebig diskutiert, darum sollen an dieser Stelle nur die für die Untersuchungen relevanten Fälle und die daraus resultierenden mechanischen Belastungen und Versagensgefahren erläutert werden. Für jeden hohlen Baum müssen dabei die einzeln wirkenden Belastungsarten zu einem Lastkollektiv zusammengefaßt und schließlich mit den gemessenen Festigkeitsverteilungen verglichen werden. In Abbildung 3.53 sind einige Versagensarten schematisch dargestellt, wie sie bei hohlen Bäumen auftreten können. Zunächst gilt für hohle Bäume grundsätzlich das gleiche wie für Bäume mit fehlerfreien Stämmen.

Eine einseitige Windbelastung, Krümmung oder Schiefstellung des Stammes führt zu erhöhten Druck- bzw. Zugspannungen parallel zur Stammachse auf der Druck- bzw. Zugseite der Biegung. Dieser Versagensmechanismus wird durch Faserknicken auf der Druckseite eingeleitet und durch späteres Faserzerreißen auf der Zugseite abgeschlossen (Abb. 3.53 A). Weiter entstehen bei schiefen oder gekrümmten Bäumen entlang der neutralen Faser der Biegung erhöhte Schubspannungen sowie auf der Druckseite der Biegung Querkzugspannungen in radialer und tangentialer Richtung. Für gekrümmte Bäume und bei Wurzelanläufen von Bäumen mit deutlicher Ausbildung einer Brettwurzel kommen auf der Zugseite der Biegung im Bereich der schärfsten Krümmung erhöhte Querkzugspannungen (Unglücksbalken) hinzu (vgl. Kap. 3.4). Bei hohlen Bäumen führt die vorherrschende Biegebelastung des Stammes zu querschnittsverflachenden Querkräften, die mit fortschreitendem Versagensablauf zu einer Zerbretterung an jeweils um 90° versetzten Stellen führen (Abb. 3.53 B). Diese Stellen sind in den Bereichen der schärfsten und der schwächsten Krümmung des Querschnitts lokalisiert. Bei Holz kommt es wegen der geringen Querfestigkeiten nicht zu einer stärkeren Ovalisierung, sondern frühzeitig zu der erwähnten Zerbretterung. An diesen Stellen entstehen die höchsten Biegemomente, d.h. dort liegen die höchsten tangentialen Zug- und Druckspannungen vor. Aufgrund der radial gerichteten Komponente der tangentialen Spannungen sind die radialen Zugspannungen im Bereich einer Begradigung (entsprechend der Entstehung eines Unglücksbalkens) und die radialen Druckspannungen im Bereich einer Zunahme der Krümmung ebenfalls höher als im restlichen Querschnitt. Hohle Bäume mit offenen Querschnitten bergen weitere Gefahren des Versagens in sich. Befindet sich die Aushöhlung im unteren Bereich des Stammes, wie dies bei vielen älteren Eschen oder Eukalypten der Fall ist, kommt es bei entsprechender Windbelastung oder Schiefstellung zu Querkzugspannungen im Bereich der meist vorhandenen Fußglocke und zu Schubspannungen oberhalb der Öffnung (Abb. 3.53 C). Aber auch bei Öffnungen oder alten Wunden, die nicht vom Boden ausgehen sowie oberhalb einer um 90° gedrehten Biegeachse entstehen Schubspannungen (Abb. 3.53 D, E).

Nachdem nun die wichtigsten Versagensarten bzw. Versagensgefahren hohler Bäume vorgestellt wurden, werden nachfolgend die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen im einzelnen dargestellt und diskutiert. Von den heimischen Baumarten wurden Pappel, Ahorn, Edelkastanie, Esche und Eiche untersucht, wobei jedoch nur die Ergebnisse von drei Edelkastanien (zwei hohle, eine mit fehlerfreiem Stamm), einer Esche sowie einer Pappel ausführlich vorgestellt werden. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen der restlichen Bäume werden kurz zusammengefaßt. Abschließend werden dann die Ergebnisse einer Feldstudie an hohlen Eukalypten auf Tasmanien (Australien) erläutert (ZIPSE et al., 1996a).

Bei den Untersuchungen an heimischen Laubbäumen wurden in der Regel in vier verschiedenen Höhen und vier (um 90° versetzt) bzw. acht (um 45° versetzt) verschiedenen Richtungen je Höhe die Druckfestigkeit in Faserrichtung sowie die radiale und tangentiale Biegefestigkeit an radial entnommenen Bohrkernen ermittelt. Aufgrund der Bohrkernlänge konnten die verbliebenen Restwandstärken und dadurch das t/r -Verhältnis bestimmt werden. Das ungefähre Ausmaß der Faulhöhle war hierdurch ebenfalls bekannt und für die Diskussion der auftretenden Belastungen bereitgestellt. Bei der Darstellung der gemessenen Festigkeitswerte (Mittelwerte entlang eines Bohrkernes) sind jeweils die t/r -Verhältnisse an den Bohrkernentnahmestellen angegeben, ebenso teilweise der ungefähre maßstäbliche Restquerschnitt (Abbildungen 3.55 bis 3.58).

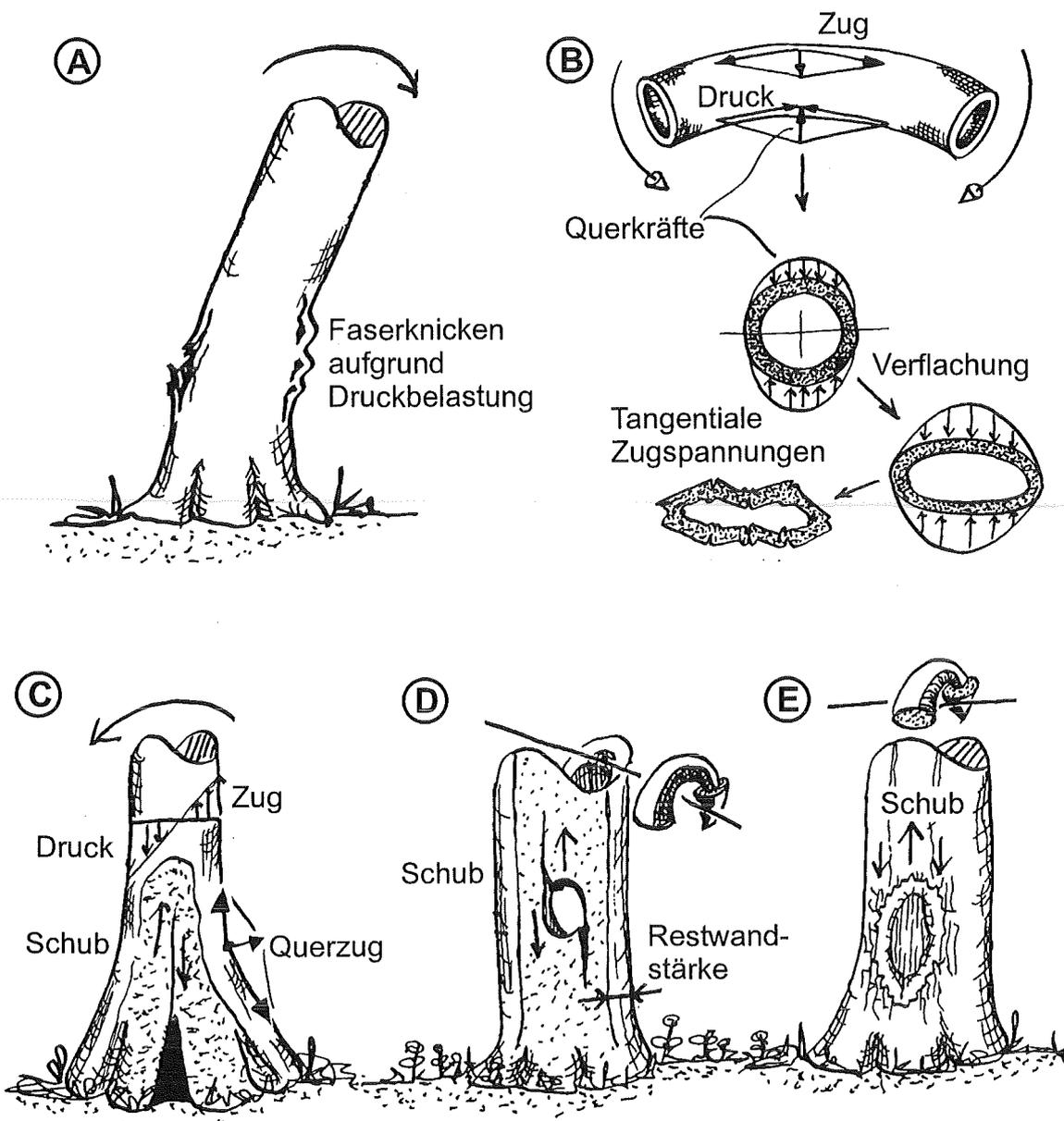


Abbildung 3.53: Einige Beispiele von Versagensarten an Bäumen (Zeichnungen: C. Mattheck).

- normaler Biegebruch des Vollzylinders.
- Querschnittsverflachung aufgrund von Querkräften bei hohlen Bäumen.
- Schub- und Querspannungen bei Fußglocken mit offenen Querschnitten.
- Schubspannungen bei Öffnungen in der Biegeachse.
- Schubspannungen oberhalb einer Öffnung oder einer Wunde auf der Druck- oder Zugseite.

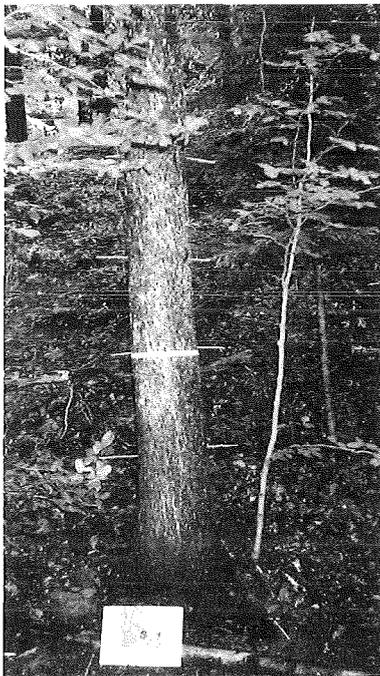
Abbildung 3.54 zeigt die drei untersuchten, schiefen Edelkastanien jeweils in einer Gesamtaufnahme. In Abbildung 3.55 sind die Ergebnisse der Festigkeitsmessungen an **Edelkastanie 1** dargestellt. In den Diagrammen sind jeweils die Mittelwerte der untersuchten Festigkeitskenngrößen entlang eines Bohrkernes je Seite und Meßhöhe aufgetragen. Es handelte sich hierbei um einen Baum mit fehlerfreiem Stamm und leichter Schiefstellung, der zu Vergleichszwecken herangezogen wird. Auf der Druckseite des schiefen Baumes waren die Druckfestigkeiten in Faserrichtung erwartungsgemäß in allen Höhen am größten. Bei den tangentialen Biegefestigkeiten zeigte sich ein ähnliches Verhalten. Die höchsten Werte befanden sich meist auf der Druckseite, bei jedoch nur geringen Unterschieden. Auch die Werte der radialen Biegefestigkeit lagen auf allen Seiten relativ dicht zusammen und waren bei 0,5 m deutlich größer im Vergleich zu den restlichen Höhen. Diese Beobachtung wurde bereits bei den Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen gemacht und wurde hier nochmals bestätigt. Zu beachten ist, daß die Werte der tangentialen und der radialen Biegefestigkeiten in etwa von der gleichen Größe waren.

Edelkastanie 2 war ebenfalls ein schiefer Baum und besaß einen offenen Querschnitt (Öffnung befindet sich senkrecht zur Druckseite) sowie eine mittige (0,5 m Höhe) bzw. außermittige Faulhöhle (restliche Höhen auf der Druckseite). Das minimale t/r -Verhältnis betrug 0,6, d.h. es handelte sich um einen dickwandigen Querschnitt. Auf der Druckseite war wiederum die Druckfestigkeit in Faserrichtung bei allen Höhen am größten. Bei den tangentialen Biegefestigkeiten ließ sich keine Seite mit durchweg höheren Werten angeben, die Meßwerte schwankten nur wenig und entsprachen im Mittel denen der zuvor untersuchten fehlerfreien Edelkastanie. Die Werte der radialen Biegefestigkeit lagen auf allen Seiten deutlich über denen bei Edelkastanie 1 und betragen in etwa das doppelte der Werte der tangentialen Biegefestigkeit. Dieser alleinige Anstieg der radialen Biegefestigkeiten könnte darin begründet sein, daß wegen der Dickwandigkeit des Querschnitts keine querschnittsverflachenden Querkräfte entstanden und damit auch keine Beulgefahr vorlag. Der offene Querschnitt jedoch führte zu einem weniger steifen Verhalten des Restquerschnitts und der Stamm wurde im Bereich der Öffnung biegeweicher. Eine Erhöhung der radialen Biegefestigkeiten war in diesem Fall also durchaus ein sinnvolles Mittel durch Ausbildung einer besseren Querverriegelung im betroffenen Stammbereich den Baum vor dem Versagen infolge der größeren Verformungen und Dehnungen zu schützen (Abbildung 3.56).

Edelkastanie 3 besaß einen geschlossenen Querschnitt mit einer mittigen Faulhöhle und war ebenfalls schief. Das minimale t/r -Verhältnis betrug 0,32, meist lagen die t/r -Verhältnisse aber zwischen 0,45 und 0,7. Erwähnenswert sind eine kleine, alte Wunde auf der Zugseite und eine äußere, ovale Form des Querschnitts bis zu einer Höhe von 1 m. Diese ovale „Ausbauchung“ befand sich auf der Druckseite und dürfte der Grund dafür gewesen sein, daß in 0,5 m Höhe keine erhöhte Druckfestigkeiten in Faserrichtung vorlagen, dies jedoch in 1 bzw. 1,5 m Höhe wieder der Fall war. In 2 m Höhe waren alle Druckfestigkeiten nahezu identisch, lediglich die Zugseite wies geringere Druckfestigkeiten auf. Auch in 1 und 1,5 m Höhe lagen deren Druckfestigkeiten deutlich unter denen der anderen Seiten. Die Werte der radialen Biegefestigkeit sanken auf allen Seiten mit zunehmender Höhe im Mittel um 50%. Ausnahmen waren in 1 m Höhe die Druck- und Zugseite, dort stiegen die Werte an und fielen in 1,5 m Höhe jedoch wieder deutlich. Eine leichte Krümmung (schwach ausgebildeter Unglücksbalken) in diesem Bereich und die nachlassende Ovalisierung (Druckseite, dort fand auch ein Anstieg der

Druckfestigkeiten statt) könnten die Ursachen hierfür sein. Die tangentialen Biegefestigkeiten waren auch bei dieser Edelkastanie auf allen Seiten und Höhen ungefähr gleich. Signifikant war lediglich, daß diese auf der Druckseite mit dem geringsten t/r -Verhältnis meist etwas höher lagen als auf den übrigen Seiten (Abbildung 3.57).

Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen an senkrechten und hohlen Bäumen mit t/r -Verhältnissen über 0,5 werden hier nur kurz zusammengefaßt. Bei allen Bäumen (Pappel, Eiche, Ahorn, Esche) bildeten sich deutlich sichtbare Defektsymptome (Beulen) aufgrund der inneren Faulhöhlen. Diese erstreckten sich immer über den gesamten Meßbereich. Die Druckfestigkeiten in Faserrichtung entsprachen denen bei fehlerfreien Bäumen und waren ebenso über sämtliche Meßhöhen hinweg weitgehend konstant. Auch die radialen Biegefestigkeiten entsprachen denen bei fehlerfreien Bäumen, wobei der bekannte Rückgang mit zunehmender Höhe vergleichsweise niedrig ausfiel. Die Ursache hierfür dürfte in der Existenz der Faulhöhlen im gesamten Meßbereich liegen. Die gewonnenen Meßergebnisse stehen damit nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen von ALBRECHT, der ausschließlich Faulhöhlen im Wurzelstock untersuchte und einen stärkeren Abfall der radialen Biegefestigkeiten mit zunehmender Höhe fand (ALBRECHT, 1995). Die tangentialen Biegefestigkeiten stiegen bei Ahorn eindeutig mit abnehmender Höhe und sinkendem t/r -Verhältnis, bei Esche ebenfalls mit sinkendem t/r -Verhältnis während bei den drei untersuchten Pappeln keine derartige Tendenz zu erkennen war.



Edelkastanie 1



Edelkastanie 2



Edelkastanie 3

Abbildung 3.54: Gesamtansicht einer schiefen und fehlerfreien (Edelkastanie 1) sowie von zwei schiefen und hohlen Edelkastanien (*Castanea sativa* Mill.). Die weißen Stifte kennzeichnen die Bohrkernentnahmestellen zur Ermittlung der radialen bzw. tangentialen Biegefestigkeiten und der Druckfestigkeiten in Faserrichtung.

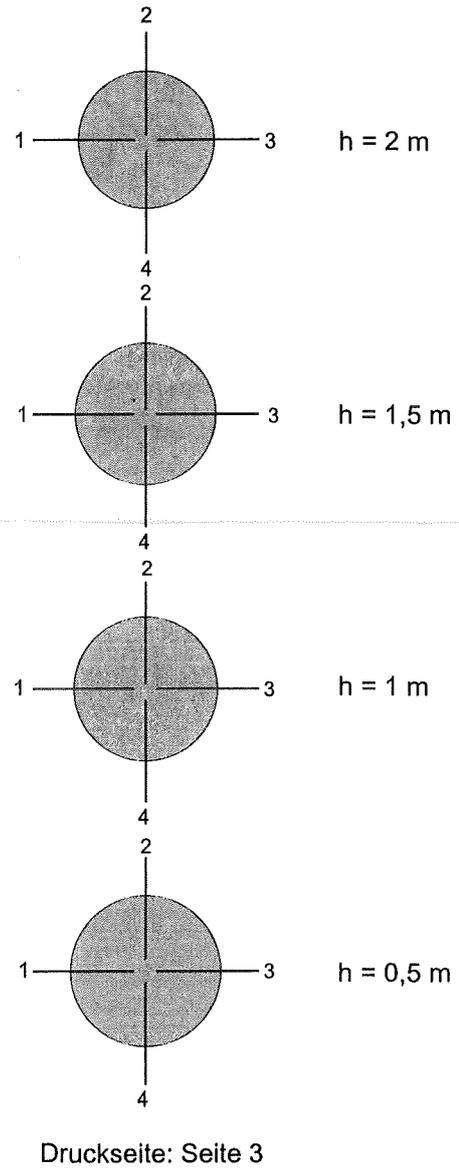
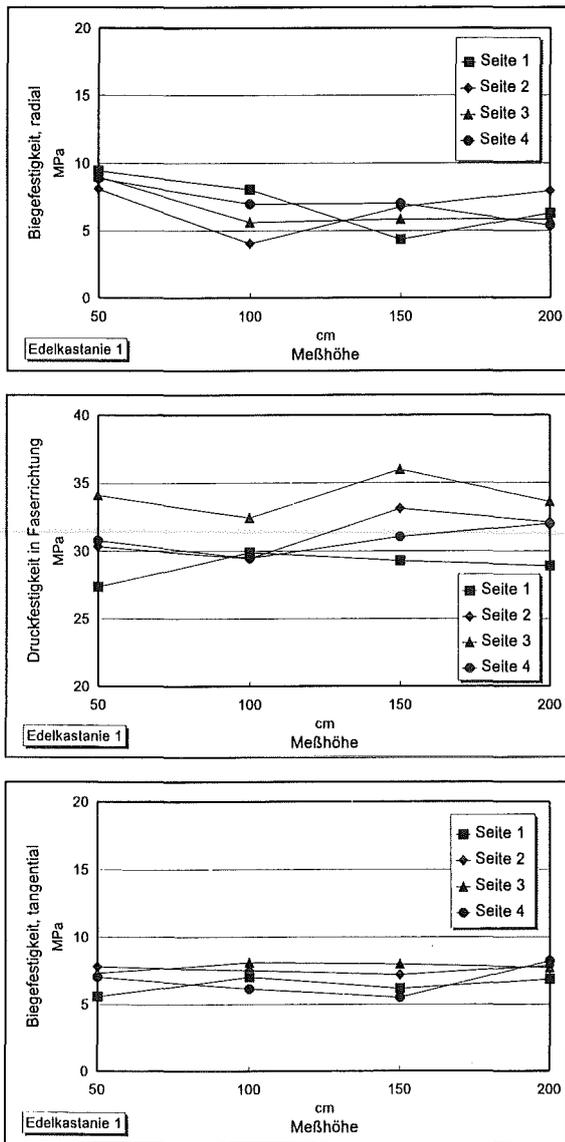
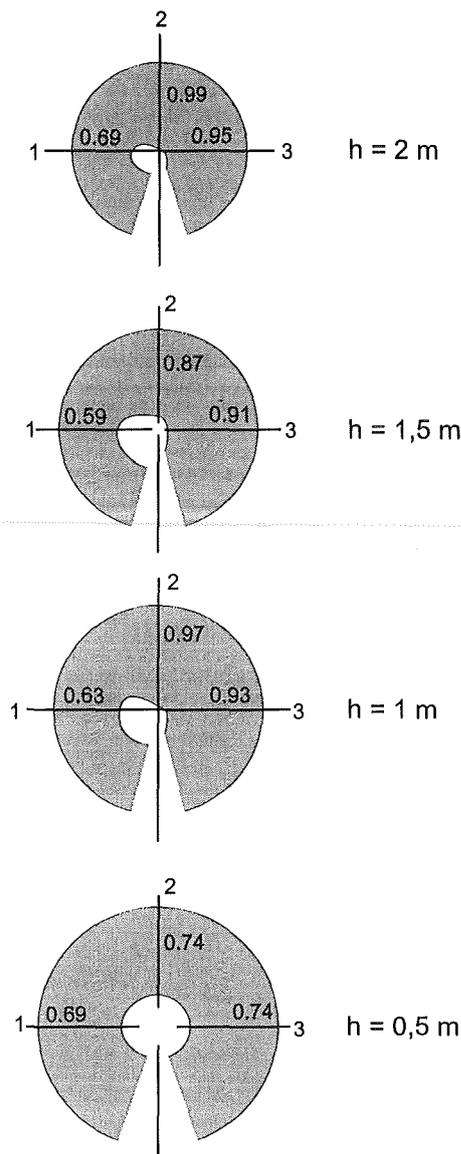
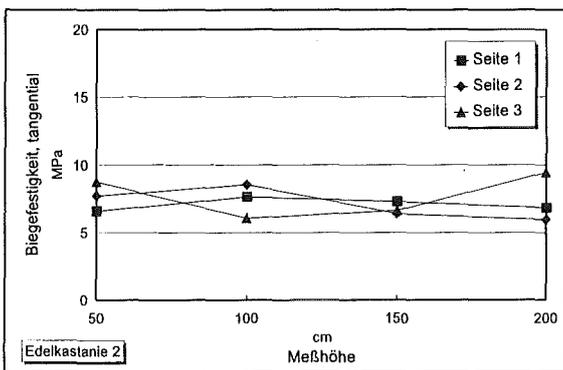
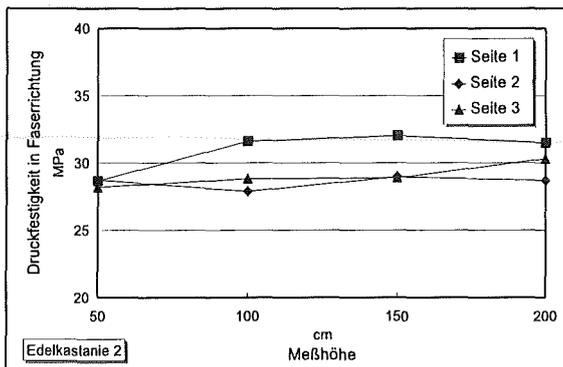
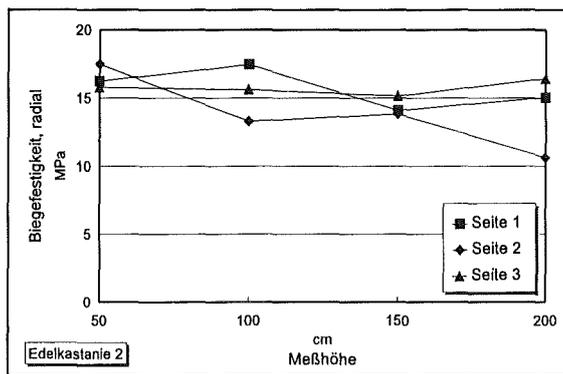
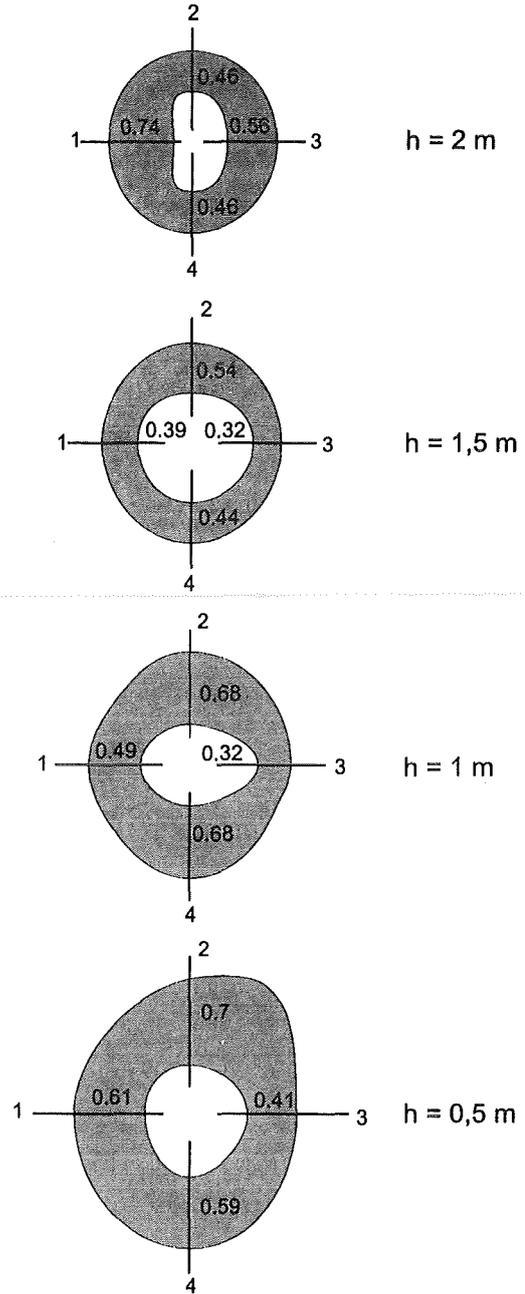
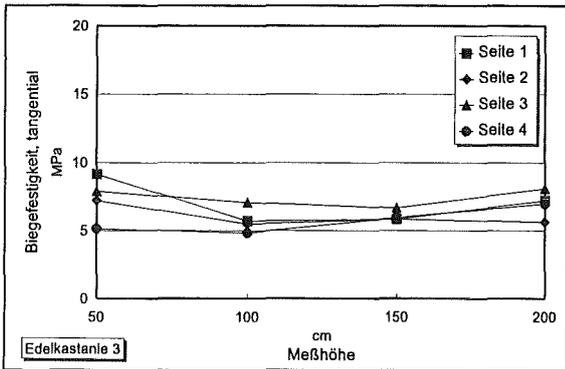
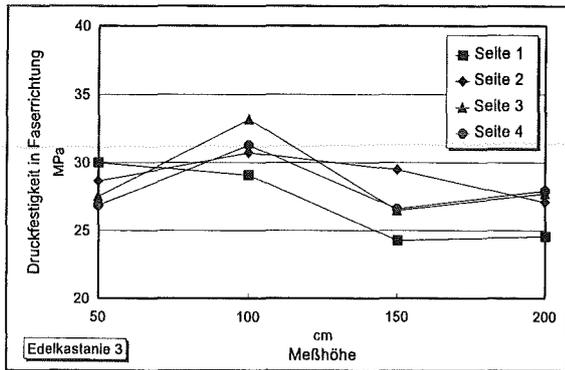
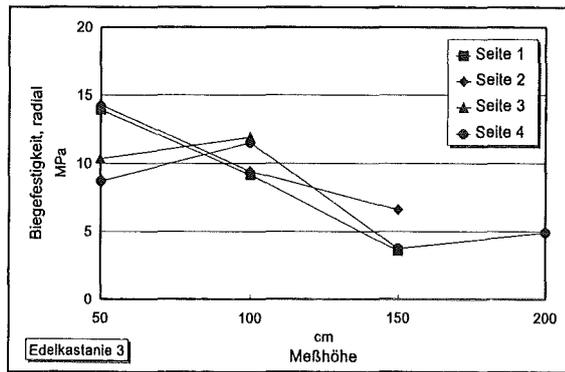


Abbildung 3.55: Mittelwerte der tangentialen und radialen Biegefestigkeiten sowie der Druckfestigkeiten in Faserrichtung je Seite und Höhe einer schiefen Edelkastanie (Edelkastanie 1), aufgetragen über der Höhe. Daneben ist für jede Höhe der dazugehörige Querschnitt schematisch dargestellt.



Druckseite: Seite 1

Abbildung 3.56: Mittelwerte der tangentialen und radialen Biegefestigkeiten sowie der Druckfestigkeiten in Faserrichtung je Seite und Höhe einer schiefen und hohlen Edelkastanie (Edelkastanie 2), aufgetragen über der Höhe. Daneben ist für jede Höhe der dazugehörige Querschnitt schematisch dargestellt und die t/r-Verhältnisse an den Bohrkernentnahmestellen als Zahlenangaben beigefügt.



Druckseiten: Seite 2 und 3

Abbildung 3.57: Mittelwerte der tangentialen und radialen Biegefestigkeiten sowie der Druckfestigkeiten in Faserrichtung je Seite und Höhe einer schiefen und hohlen Edelkastanie (Edelkastanie 3), aufgetragen über der Höhe. Daneben ist für jede Höhe der dazugehörige Querschnitt schematisch dargestellt und die t/r-Verhältnisse an den Bohrkernentnahmestellen als Zahlenangaben beigefügt.

Auch bei Untersuchungen an zwei hohlen Pappeln mit geringeren Restwandstärken waren deutlich ausgebildete Defektsymptome in Form von Beulen im unteren Stammbereich vorhanden. Die untersuchten Festigkeitskenngrößen zeigten bei einer hier nicht näher vorgestellten Pappel keine Erhöhung ihrer Festigkeiten. Die ermittelten Festigkeiten entsprachen denen von fehlerfreien Pappeln. Das t/r -Verhältnis betrug im Mittel 0,25 und es konnte kein Zusammenhang zwischen dem t/r -Verhältnis und den gemessenen Festigkeiten festgestellt werden. Die Ergebnisse der Festigkeitsmessungen an der zweiten **Pappel** mit geringer Restwandstärke zeigt Abbildung 3.58. Es handelte sich hierbei um eine schiefe und hohle Pappel mit einem offenen Querschnitt bis zur Höhe von ca. 0,5 m. Das minimale t/r -Verhältnis betrug 0,06 (bei 0,5 m Höhe) und lag im Mittel in 0,5 m Höhe bei 0,15, bei den restlichen Höhen zwischen 0,25 und 0,4. Der Baum kann demnach als extrem beulgefährdet eingestuft werden. Die Ausbildung eines Defektsymptomes in Form einer Beule war hier besonders ausgeprägt und erinnerte etwas an eine Schlange, die gerade ein Straußenei verschluckt hat. Die Druckfestigkeiten in Faserrichtung waren stets auf der Druckseite (Seite F, D, E) am höchsten. Die einzige Ausnahme stellte in 1 m Höhe Seite G dar. Aufgrund der Schiefstellung und der Geometrie der Höhlung bzw. Baumöffnung wirkten auf den Seiten F und J Querkräfte in Richtung einer Verstärkung der Krümmung, auf den Seiten G und E (D) Querkräfte in Richtung einer Begradigung. Die tangentialen und radialen Biegefestigkeiten waren deshalb fast immer auf den Seiten erhöht, bei denen aufgrund querschnittsverflachenden Querkräften die Gefahr des Versagens hoch war. Dies war bei den Seiten J, F, G und E (D) der Fall, denn dort lagen teilweise doppelt so hohe Werte wie auf den anderen Seiten des gleichen Querschnitts vor.

Als abschließendes Beispiel bei der Untersuchung heimischer und hohler Bäume wurde eine schwach geneigte **Esche** mit einem offenen Querschnitt und einer Höhlung im Wurzelstock untersucht. Es wurden entlang sechs vertikalen Reihen von 0,1 bis 1,4 m Höhe in kurzen Abständen radiale Bohrkerne entnommen und die radialen Biegefestigkeiten sowie die Druckfestigkeiten in Faserrichtung bestimmt. Abbildung 3.59 zeigt die untersuchte Esche anhand eines Fotos und einer maßstäblichen Zeichnung mit den Bohrkernentnahmestellen und einigen Geometriedaten. Die Ergebnisse der Festigkeitsermittlung sind als Mittelwerte der radialen Biegefestigkeiten und der Druckfestigkeiten in Faserrichtung für den Stammabschnitt ohne bzw. mit Höhlung je Reihenpaar in einer Tabelle angegeben. Die einzelnen Mittelwerte je Bohrkern sind für jede Festigkeitskenngröße und Reihe in Abbildung 3.60 über der Höhe aufgetragen. Reihe 5 und 6 befanden sich auf der Druckseite und entsprachen im Verlauf den Reihen 3 und 4 auf der Zugseite. Die Werte der Druckfestigkeiten in Faserrichtung blieben über alle Messungen hinweg annähernd konstant. Der Grund hierfür dürfte in der Bildung einer „Fußglocke“ begründet sein, aufgrund deren die Querschnittsfläche im Bereich der Höhlung der im fehlerfreien Bereich entsprach. Durch den größeren Außendurchmesser im Bereich der Höhlung wurde das Widerstandsmoment deutlich erhöht und somit die Biegespannungen reduziert. Anders stellte sich die Verteilung der radialen Biegefestigkeiten dar. Diese erhöhten sich sprunghaft beim Übergang vom fehlerfreien zum ausgehöhlten Bereich um ca. 50%, auf der Druckseite noch gravierender. Die Werte beider Festigkeitskenngrößen entsprachen im fehlerfreien Bereich den Werten, die an geraden und fehlerfreien Eschen gemessen wurden. Der Anstieg der radialen Biegefestigkeiten könnte auch hier ähnlich wie bei Edelkastanie 2 darin begründet sein, daß der offene Querschnitt zu einem weniger steifen Verhalten des Restquerschnitts führte, der Stamm wurde somit im Bereich der Öffnung biegeweicher. Weiter

entstanden wegen der Präsenz einer Fußlocke Querkraften (Unglücksbalken), denen Bäume nur durch eine Steigerung ihrer Querkraften begegnen können. Eine Erhöhung der radialen Biegekraften war also auch in diesem Fall sinnvoll, um durch Ausbildung einer besseren Querverriegelung im betroffenen Stammbereich dem Versagen vorzubeugen.

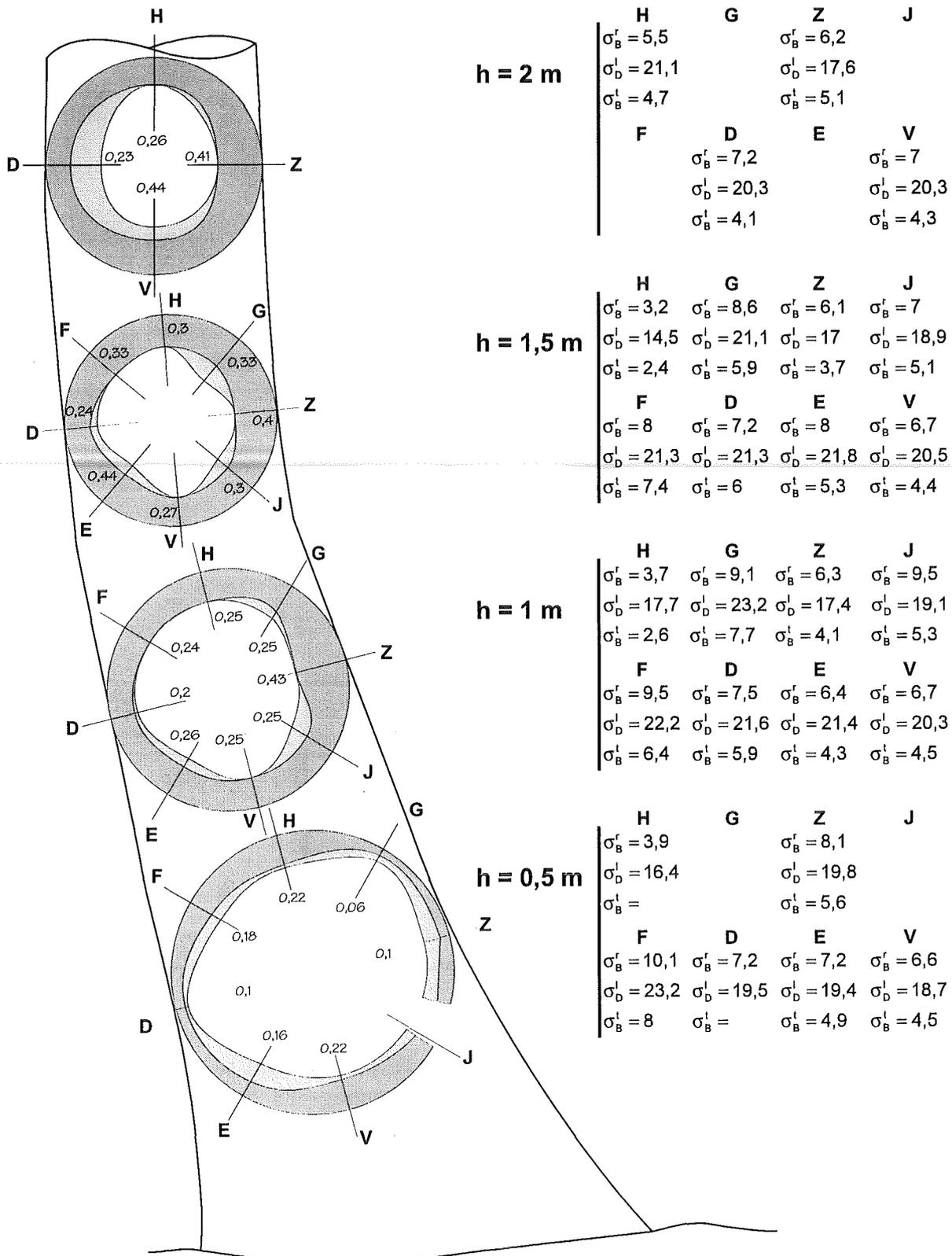
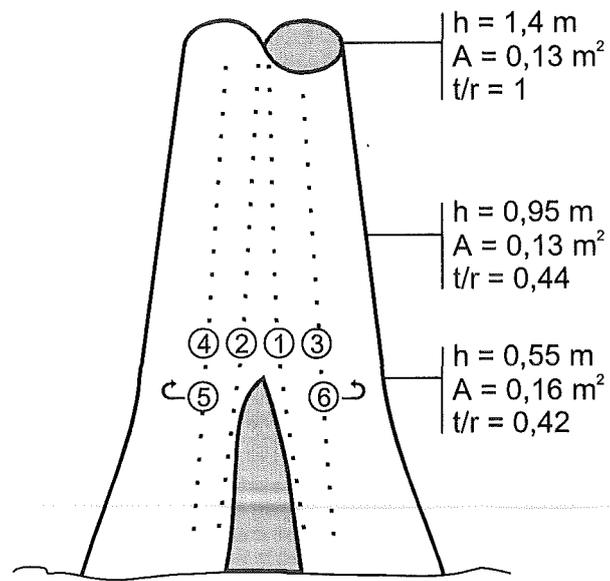


Abbildung 3.58: Mittelwerte der tangentialen und radialen Biegefestigkeiten sowie der Druckfestigkeiten in Faserrichtung je Seite und Höhe einer schiefen und hohlen Pappel. Daneben ist für jede Höhe der dazugehörige Querschnitt schematisch dargestellt und die t/r-Verhältnisse an den Bohrkernentnahmestellen als Zahlenangaben beigelegt.



Mittelwerte in MPa	Druckfestigkeit in Faserrichtung			Biegefestigkeit, radial			Biegefestigkeit / Druckfestigkeit		
	Reihe 1+2	Reihe 3+4	Reihe 5+6	Reihe 1+2	Reihe 3+4	Reihe 5+6	Reihe 1+2	Reihe 3+4	Reihe 5+6
Stammabschnitt mit Höhlung	31,6	32,6	30,6	15,8	18	18,8	0,51	0,56	0,63
Stammabschnitt ohne Höhlung	29,1	31,9	32,3	9,5	13	4,5	0,33	0,41	0,14

Abbildung 3.59: Foto und schematische Darstellung einer Esche mit hohlem Baumfuß. Die Tabelle enthält die Mittelwerte der radialen Biegefestigkeiten und der Druckfestigkeiten in Faserrichtung sowie deren Verhältnis zueinander je Reihenpaar. Die Werte sind jeweils unterteilt in einen Stammabschnitt mit und ohne Höhlung.

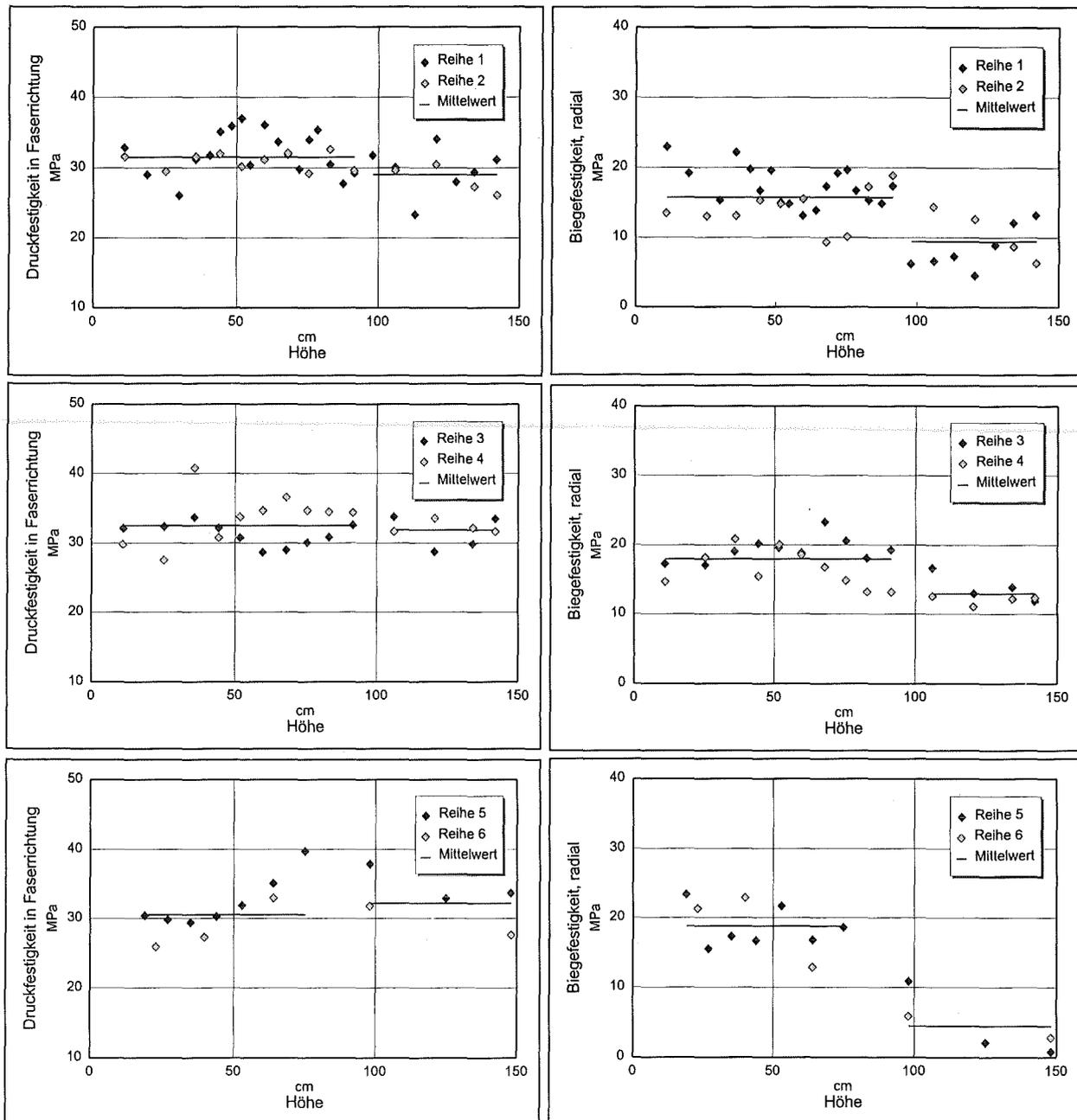


Abbildung 3.60: Mittelwerte der radialen Biegefestigkeiten sowie der Druckfestigkeiten in Faserrichtung je Bohrkern einer Esche mit hohlem Baumfuß, aufgetragen über der dazugehörigen Meßhöhe. Die in jedem Diagramm eingezeichneten Geraden geben die Mittelwerte für je zwei sich entsprechenden Reihen im Stammbereich ohne bzw. mit Höhlung an.

Im Rahmen einer weiteren Feldstudie auf Tasmanien (Australien) wurde an hohlen **Eukalyptusbäumen** in der Nähe von Hobart bzw. Glen Huon untersucht, ob diese ihre Festigkeiten last- und richtungsabhängig verteilen. Es fanden sich dort zahlreiche, außerordentlich mächtige und zugleich hohle Eukalyptusbäume, häufig mit offenen Querschnitten. Viele von diesen waren bereits Gegenstand von Untersuchungen zur Bestimmung des t/r -Verhältnisses, ab dem Bäume in der Regel bruchgefährdet sind (MATTHECK et al., 1992). Der Grund für das Vorkommen von derartigen hohlen Bäumen sind regelmäßig wiederkehrende Waldbrände gegen die Eukalyptusbäume aufgrund ihrer dicken Rinde grundsätzlich hervorragend geschützt sind. Bei bergaufwärts vordringenden Feuern entstehen jedoch aufgrund der Strömungsverhältnisse am Stamm bergseitig Wirbel. Dort verursachen sie besonders hohe Temperaturen und lassen offene Querschnitte mit verkohlten inneren Wänden der Höhlungen zurück. Diese Bäume wurden ausgewählt, um eine möglichst eindeutige Belastungssituation und infolgedessen eindeutige Veränderung ihrer Festigkeitskenngrößen zu erhalten, vorausgesetzt es gibt eine richtungs- und lastabhängige Festigkeitsverteilung. Erfährt ein derart großer Eukalyptusbaum eine Schiefstellung entsteht zweifelsfrei eine enorm druckbelastete Seite (Druckseite). Auf jener Seite sollte er nun auch mit einer merklichen Erhöhung seiner Druckfestigkeiten reagieren, um dem Versagen infolge Faserknicken entgegenzuwirken. Natürlich sind nicht alle vorherrschenden Belastungen genauso klar zu erkennen. Deswegen sollen analog den vorangegangenen Untersuchungen bei der Erläuterung der Ergebnisse jeweils die wesentlichen Belastungsarten herausgestellt und die Verteilung der dazugehörigen Festigkeitskenngrößen zum Vergleich herangezogen werden. Als Festigkeitskenngrößen wurden die tangentielle und radiale Biegefestigkeit, die Druckfestigkeit in Faserrichtung sowie die Schubfestigkeit mit der longitudinal-radialen Ebene als Scherfläche und longitudinaler Belastungsrichtung ermittelt. Je nach Baum wurden zwischen drei und sechs Bohrkern in ca. 1,3 m Höhe radial entnommen. Die Entnahmestellen wurden so gewählt, daß an biomechanisch sinnvollen Orten und zum Vergleich an Stellen dazwischen die Festigkeitskenngrößen gegenübergestellt werden konnten. Im Falle einer richtungs- und lastabhängigen Verteilung der Festigkeiten müßte also an den Orten, an denen aufgrund der Baumgeometrie eine Beanspruchungsart (z.B. Schub oder Druck) zu vermuten ist auch die dazugehörige Festigkeitskenngrößen höher sein als an Stellen ohne eine solche Beanspruchung. In den weitgehend selbsterklärenden Abbildungen 3.61 bis 3.67 sind die Ergebnisse der Untersuchungen an fünf Bäumen der Gattung *Eucalyptus obliqua* und von zwei Bäumen der Gattung *Eucalyptus globulus* dargestellt. Sie beinhalten jeweils ein Foto des Baumes und eine Skizze des noch vorhandenen Restquerschnitts in der Meßebeine mit der Angabe von Windrichtung (Pfeil), Schiefstellung (Biegeachse und Druckseite (D)), Öffnungen (X) sowie den Bezeichnungen der Bohrkernentnahmestellen. Die Mittelwerte je Festigkeitskenngrößen und Bohrkernentnahmestelle sind in einer Tabelle zusammengefaßt, wobei die grau unterlegten Felder die höchsten Werte einer Festigkeitskenngrößen kennzeichnen.

Baum 1 (*Eucalyptus obliqua*) besaß durchweg die höchsten Festigkeiten auf der Druckseite (Seiten 2 und 3). Die Druckseite war aufgrund der Schiefstellung des Baumes und der Windrichtung eindeutig bestimmbar. Die beiden anderen Seiten erfuhren keine bevorzugte Beanspruchung und wiesen auch geringere Festigkeiten auf. Die Erhöhung der tangentialen und radialen Biegefestigkeiten sowie der Druckfestigkeiten in Faserrichtung auf der Druckseite zur Vermeidung von Faserknicken wurde bereits ausgiebig erläutert.

Auch die Biegefestigkeiten senkrecht zur Faser tragen zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit in Faserrichtung bei. Sie widersprechen also nicht einer richtungsabhängigen Festigkeitsverteilung. Der Grund für die Erhöhung der Schubfestigkeiten in Faserrichtung könnte zum einen an dem ausgeprägten Wurzelanlauf auf der Druckseite liegen, oberhalb dessen wegen der höheren Steifigkeit Schubspannungen entstanden. Zum anderen wurde bei nahezu allen untersuchten Eukalyptusbäumen eine ähnliche Festigkeitsverteilung von tangentialer Biegefestigkeit und Schubfestigkeit beobachtet (Abbildung 3.61).

Baum 2 (*Eucalyptus obliqua*) stellte einen etwas komplizierteren Fall dar. Der Baum war sowohl in Richtung der Öffnung, als auch senkrecht zur Öffnung schief. Dadurch waren die Seiten 1, 4 und 5 jeweils druckbelastet, die gemessenen Druckfestigkeiten bestätigten dies. Seite 5 erfuhr durch beide Schiefstellungen Druck, die Seiten 1 und 4 nur je durch eine. Zu beachten ist, daß Seite 1 weiter von der Biegeachse entfernt lag wie Seite 4 und deshalb deutlich geringeren Druckbelastungen ausgesetzt war. Auf diesen drei Seiten bestätigten sich diese Aussagen bei den Festigkeitsverteilungen. Auf Seite 5 waren durchweg alle Festigkeitskenngrößen erhöht, etwas abgeschwächt auch auf Seite 4. Schließlich war auf Seite 1 lediglich die Druckfestigkeit in Faserrichtung höher. Auf Seite 3 waren aufgrund eines ausgeprägten Wurzelanlaufes und den daraus entstehenden Querkraften auf der Zugseite höhere radiale Biegefestigkeiten keine Überraschung. Die Schubbelastung und tangentialen bzw. radialen Querkraftbelastungen waren wegen der Überlagerung der beiden Schiefstellungen auf Seite 2 lokalisiert. Zusätzlich befand sich dort auch die geringste Restwandstärke. Eine Erhöhung der dazugehörigen Festigkeitskenngrößen fand auch in diesem Fall statt (Abbildung 3.62).

Baum 3 (*Eucalyptus globulus*) war ein vergleichsweise kleiner Baum. Er entsprach jedoch exakt dem von MATTHECK und BRELOER (1994) beschriebenen Beispiel eines in einem Schlauch steckenden Besenstiels zur Beschreibung des Schlauchknickens eines hohlen Baumes. Die Schiefstellung des Stammes oberhalb des hohlen Stammbereiches erhöhte die Knickgefahr um ein Vielfaches, vergleichbar mit der Druckbelastung einer vorgebogenen Fahrradspeiche gegenüber einer geraden. Im Gegensatz zu einer Fahrradspeiche kann ein Baum jedoch seine Materialqualität verbessern, um dem Knickversagen doch noch zu entrinnen. Genauso verhielt sich dieser Baum, indem er seine tangentialen und radialen Biegefestigkeiten teilweise verdoppelte. Am höchsten waren diese auf der Druckseite (Seite 1) und auf der Seite 3, die gegenüber der Öffnung lag. Auf der Druckseite waren ebenso die Druckfestigkeit und die Schubfestigkeit am höchsten. Während alle anderen Festigkeitskenngrößen bei diesem Baum weit über den Werten an fehlerfreien Eukalyptusbäumen lagen, waren die Werte der Druckfestigkeiten in Faserrichtung nicht erhöht. Es wurden also die Querkraftfestigkeiten zur Vermeidung der Knickgefahr aufgrund der bereits erfolgten Krümmung drastisch gesteigert. Am stärksten dort, wo auch die Knickgefahr am größten war, nämlich auf der Druckseite (Abbildung 3.63).

Baum 4 (*Eucalyptus obliqua*) hatte gegenüber den anderen Bäumen die Besonderheit, daß die Windrichtung entgegengesetzt zur Schiefstellung gerichtet war. Die Druckfestigkeiten nahmen trotzdem von der Druckseite (Seite 1 und 2) zur Zugseite (Seite 5 und 6) hin stetig ab. Die dazwischen liegenden Seiten 3 und 4 waren durch Schub und Querkraften belastet. Dort waren auch die höchsten tangentialen und radialen Biegefestigkeiten sowie Schubfestigkeiten lokalisiert (Abbildung 3.64).

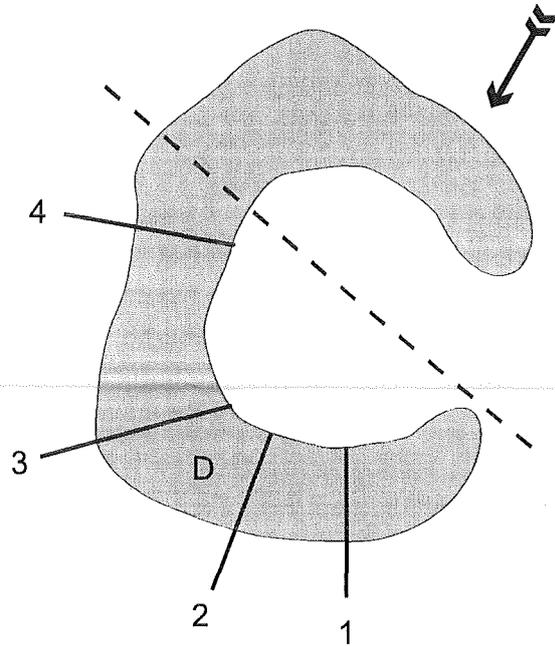
Baum 5 (*Eucalyptus obliqua*) besaß nur eine kleine Öffnung und auch die Schiefstellung war eher gering. Die gemessenen Festigkeiten lagen durchweg im Bereich der bei fehlerfreien Eukalyptusbäumen ermittelten Werte. Trotz des niedrigen Niveaus der Werte waren die Festigkeiten auch hier last- und richtungsabhängig verteilt. Die Druckfestigkeiten nahmen von der Druckseite (Seite 1) zur Zugseite (Seite 5) hin stetig ab. Auf der durch Schub und Querkräfte belasteten Seite 3 waren auch die höchsten tangentialen Biegefestigkeiten und Schubfestigkeiten lokalisiert. Die erhöhten radialen Biegefestigkeiten auf den Seiten 1 bzw. 5 stellten eine Reaktion auf Druckbelastung bzw. radiale Querkraft dar (Abbildung 3.65).

Baum 6 (*Eucalyptus obliqua*) verfügte über zwei Öffnungen, die sich unterhalb der Bohrkernentnahmestelle 1 bzw. 4 befanden. Erneut nahmen die Druckfestigkeiten von der Druckseite (Seite 1) zur Zugseite (Seite 4) hin stetig ab. Die radialen Biegefestigkeiten waren auf den Seiten 1 und 5 bzw. 4 aufgrund der Druckbelastung bzw. radialen Querkraft erhöht. Die Öffnungen unterhalb Seite 1 und 4 führten zu einer Schubbelastung (vgl. Abb. 3.53), so daß das Vorhandensein der höchsten Werte der Schubfestigkeiten und der tangentialen Biegefestigkeiten auf diesen Seiten abermals eine last- und richtungsabhängige Festigkeitsverteilung bestätigte (Abbildung 3.66).

Baum 7 (*Eucalyptus globulus*) stellte einen Sonderfall der hier untersuchten Bäume dar. Der noch verbliebene Restquerschnitt und die enorme Schiefstellung werfen die Frage auf, wie der mächtige Baum überhaupt noch dem Versagen durch Faserknicken widerstehen kann. Aufgrund der eindeutigen und außerordentlichen Druckbelastung war es deswegen von besonderem Interesse, ob hier eine Anpassung der Festigkeiten an die extreme Belastungssituation stattgefunden hat. Die Werte der tangentialen und radialen Biegefestigkeit sowie insbesondere der Druckfestigkeit in Faserrichtung lagen im Vergleich zu geraden und fehlerfreien Eukalyptusbäumen deutlich höher. Die höchsten Werte dieser Festigkeitskenngrößen wurden auf der am stärksten druckbelasteten Seite 3 gemessen. Die Festigkeitsverhältnisse von tangentialer bzw. radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung entsprachen denen von geraden und fehlerfreien Eukalyptusbäumen. Geht man davon aus, daß diese Festigkeitsverhältnisse für einen extrem druckbelasteten Eukalyptusbaum (*Eucalyptus globulus*) optimal waren, überraschen die ähnlichen Festigkeitsverhältnisse bei geraden und fehlerfreien Bäumen der gleichen Art keinesfalls. Auch beim geraden und fehlerfreien Baum wird im Stammbereich das Versagen durch Faserknicken auf der Druckseite eingeleitet. Insofern erscheint es durchaus schlüssig, daß bei gleicher Versagensgefahr, nämlich dem Faserknicken, ähnliche Festigkeitsverhältnisse vorliegen. Die Schubfestigkeiten in Faserrichtung waren nicht in dem Maße erhöht wie die restlichen Festigkeitskenngrößen. Dafür kommen möglicherweise zwei Gründe in Betracht. Zum einen war der untersuchte Baum an den Bohrkernentnahmestellen zwar einer starken Druckbelastung ausgesetzt, jedoch keiner Schubbelastung. Zum anderen wurde bereits bei den zuvor untersuchten Eukalyptusbäumen beobachtet, daß die Mittelwerte der Schubfestigkeit in Faserrichtung maximal 17,5 MPa betragen. Es könnte hier also eine obere Grenze für die Schubfestigkeit in Faserrichtung vorliegen. In dem Tabellenwerk von LAVERS (1983) wurde dieser Wert übrigens von keiner der über 160 verschiedenen Baumarten überschritten. Um einen Einblick darin zu erhalten, mittels welcher struktureller Veränderungen diese hohen Festigkeiten erreicht werden konnten, wurden an der am stärksten druckbelasteten Seite Proben entnommen und lichtmikroskopisch untersucht. In Abbildung 3.68 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen von je einem Tangential- und Querschnitt bei 63facher

Vergrößerung sowie von zwei Querschnitten bei 163facher Vergrößerung dargestellt. Die Gefäße stellen bei Druckbelastung ohne Zweifel eine Schwachstelle dar, wie im Kapitel 3.7 am Beispiel einer Eiche mit Faserstauchungen deutlich zu sehen war. Die Funktion der Festigung wird von den umgebenden Fasern übernommen. Die Gefäße vieler Laubbäume besitzen deshalb gar keine oder nur eine sehr schwach ausgebildete S2-Schicht der Sekundärwand. Es stellte sich aufgrund der lichtmikroskopischen Untersuchungen heraus, daß die Gefäße eine außergewöhnlich dicke Zellwand in Form einer ausgeprägten Sekundärwand besaßen, die teilweise mehr als doppelt so dick wie die Zellwände der umgebenden Längsfasern waren. Bei einem fehlerfreien Baum der gleichen Art sowie anderen Eukalyptusarten wurde eine eindeutig geringere Zellwanddicke der Gefäße im Vergleich zu den Fasern beobachtet. Die Zellwand der Gefäße war dort in keinem Fall dicker als die Zellwand der Fasern. Die extreme Ausbildung der S2-Schicht der Gefäßwände verringert die Knickgefahr wegen des deutlich höheren Wandstärke/Radius-Verhältnisses wesentlich und erschwert dadurch das Einknicken der Gefäße. Es wurde dadurch eine der wesentlichen Schwachstellen bei Druckbelastung beseitigt. Die Ermittlung von Festigkeitsverteilungen und daran anschließende lichtmikroskopische Untersuchungen extrem belasteter Baumteile stellen demnach eine geeignete Möglichkeit dar, die Art und Weise der last- und richtungsabhängigen Festigkeitsoptimierung bei Bäumen zu erforschen. Der nächste Schritt besteht sodann darin, diese Erkenntnisse auch für die Technik nutzbar zu machen. Inwiefern weitere Veränderungen, wie zum Beispiel ein höherer Ligningehalt oder eine veränderte Orientierung der Fibrillen existierten, konnte an dieser Stelle nicht festgestellt werden.

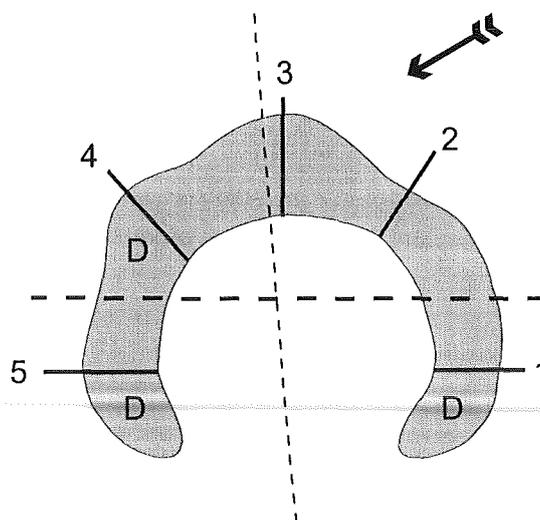
Baum 1, *Eucalyptus obliqua* (Huonville, Tasmanien)



	1	2	3	4
Biegefestigkeit, tangential	17.6	20.5	18.5	17
Biegefestigkeit, radial	16.2	29	28.6	14.6
Druckfestigkeit in Faserrichtung	39.7	44.2	44.2	35
Schubfestigkeit in Faserrichtung	16.1	17.4	16.3	12.8

Abbildung 3.61: Gesamtansicht und Skizze des untersuchten Stammquerschnitts mit Orten der Bohrkernentnahme, Markierung der Druckseite (D), Windrichtung (Pfeil) sowie der Biegeachse von Baum 1 (*Eucalyptus obliqua*). Die Zahlenwerte in der Tabelle geben die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen in MPa an den entsprechenden Meßorten an. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen hierbei die höchsten Werte je Festigkeitskenngröße.

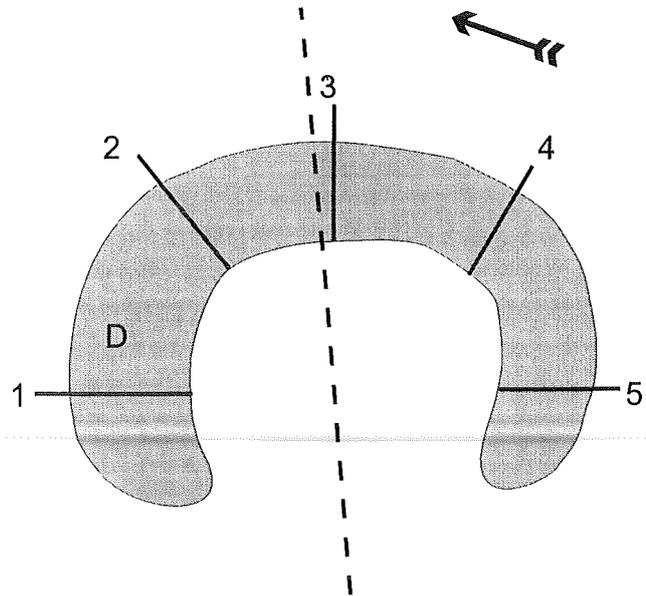
Baum 2, *Eucalyptus obliqua* (Huonville, Tasmanien)



	1	2	3	4	5
Biegefestigkeit, tangential	13.7	18.7	15.5	15.7	18.7
Biegefestigkeit, radial	14.3	34.5	26.4	22.6	25.2
Druckfestigkeit in Faserrichtung	46.6	39.1	45.3	49.3	47.3
Schubfestigkeit in Faserrichtung	12.5	14.8	13.2	14.8	15.7

Abbildung 3.62: Gesamtansicht und Skizze des untersuchten Stammquerschnitts mit Orten der Bohrkernentnahme, Markierung der Druckseite (D), Windrichtung (Pfeil) sowie der Biegeachse von Baum 2 (*Eucalyptus obliqua*). Die Zahlenwerte in der Tabelle geben die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen in MPa an den entsprechenden Meßorten an. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen hierbei die höchsten Werte je Festigkeitskenngröße.

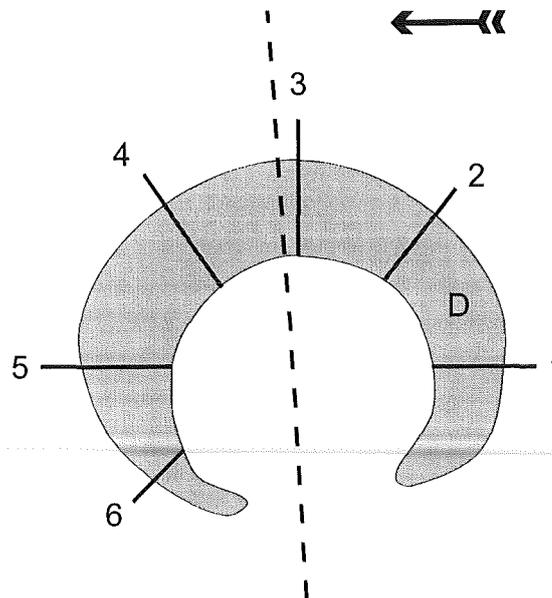
Baum 3, *Eucalyptus globulus* (Hobart, Tasmanien)



	1	2	3	4	5
Biegefestigkeit, tangential	22.5	23	24	20.3	22.3
Biegefestigkeit, radial	43.4	29.8	31.3	30	30.6
Druckfestigkeit in Faserrichtung	42.1	42.9	39.8	36.2	34.9
Schubfestigkeit in Faserrichtung	17.4	17.1	17.3	16.3	16.7

Abbildung 3.63: Gesamtansicht und Skizze des untersuchten Stammquerschnitts mit Orten der Bohrkernentnahme, Markierung der Druckseite (D), Windrichtung (Pfeil) sowie der Biegeachse von Baum 3 (*Eucalyptus globulus*). Die Zahlenwerte in der Tabelle geben die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen in MPa an den entsprechenden Meßorten an. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen hierbei die höchsten Werte je Festigkeitskenngröße.

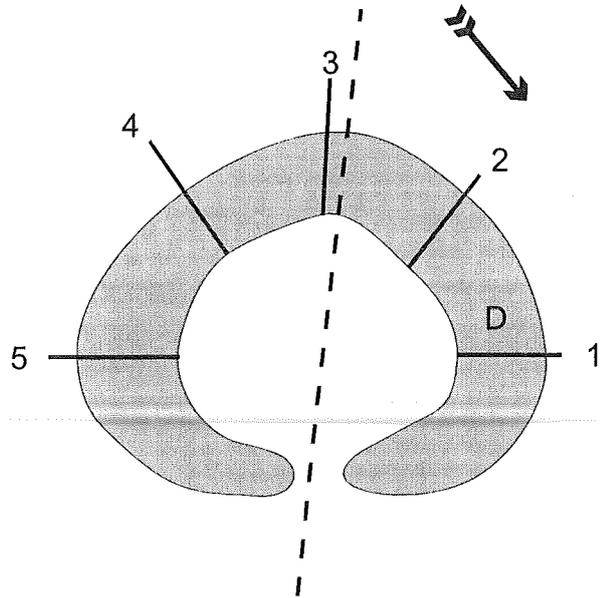
Baum 4, *Eucalyptus obliqua* (Hobart, Tasmanien)



	1	2	3	4	5	6
Biegefestigkeit, tangential	17.2	16.2	17.9	19	15.9	17.6
Biegefestigkeit, radial	15.5	25.2	30.1	19.9	17.1	15.7
Druckfestigkeit in Faserrichtung	46.7	44.4	40.8	42.1	34.4	34.3
Schubfestigkeit in Faserrichtung	14.7	16	16.9	14	12.6	14.3

Abbildung 3.64: Gesamtansicht und Skizze des untersuchten Stammquerschnitts mit Orten der Bohrkernentnahme, Markierung der Druckseite (D), Windrichtung (Pfeil) sowie der Biegeachse von Baum 4 (*Eucalyptus obliqua*). Die Zahlenwerte in der Tabelle geben die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen in MPa an den entsprechenden Meßorten an. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen hierbei die höchsten Werte je Festigkeitskenngröße.

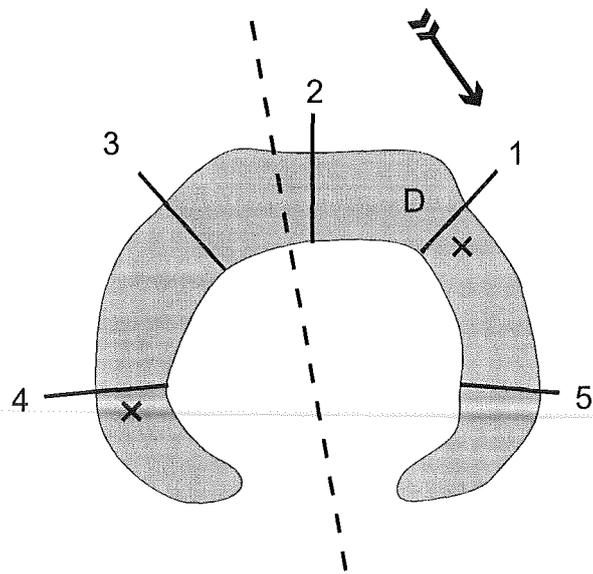
Baum 5, *Eucalyptus obliqua* (Hobart, Tasmanien)



	1	2	3	4	5
Biegefestigkeit, tangential	11.7	11.5	13.1	12	12
Biegefestigkeit, radial	19.1	13.8	14.5	15.9	18.4
Druckfestigkeit in Faserrichtung	36.9	33.9	33.6	33.4	33
Schubfestigkeit in Faserrichtung	10.6	10.2	11.7	11.6	11.5

Abbildung 3.65: Gesamtansicht und Skizze des untersuchten Stammquerschnitts mit Orten der Bohrkernentnahme, Markierung der Druckseite (D), Windrichtung (Pfeil) sowie der Biegeachse von Baum 5 (*Eucalyptus obliqua*). Die Zahlenwerte in der Tabelle geben die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen in MPa an den entsprechenden Meßorten an. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen hierbei die höchsten Werte je Festigkeitskenngröße.

Baum 6, Eucalyptus obliqua (Glen Huon, Tasmanien)

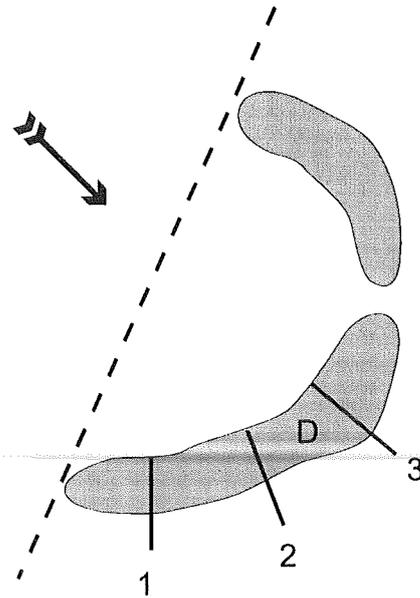


× Öffnung unterhalb Meßstelle

	1	2	3	4	5
Biegefestigkeit, tangential	15.8	11.9	13	15	11.8
Biegefestigkeit, radial	22	10.4	13.9	20.3	20
Druckfestigkeit in Faserrichtung	43.3	38.9	38.6	36.3	39.1
Schubfestigkeit in Faserrichtung	13.6	12.9	12.5	14.1	11.5

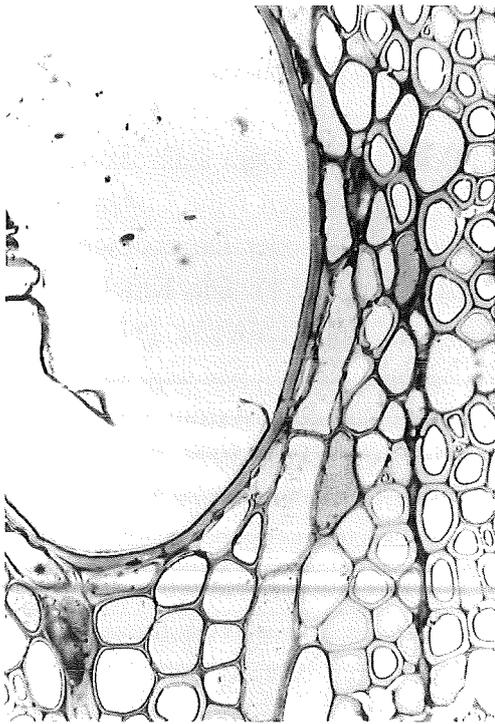
Abbildung 3.66: Gesamtansicht und Skizze des untersuchten Stammquerschnitts mit Orten der Bohrkernentnahme, Markierung der Druckseite (D), Windrichtung (Pfeil) sowie der Biegeachse von Baum 6 (*Eucalyptus obliqua*). Die Zahlenwerte in der Tabelle geben die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen in MPa an den entsprechenden Meßorten an. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen hierbei die höchsten Werte je Festigkeitskenngröße.

Baum 7, *Eucalyptus globulus* (Hobart, Tasmanien)

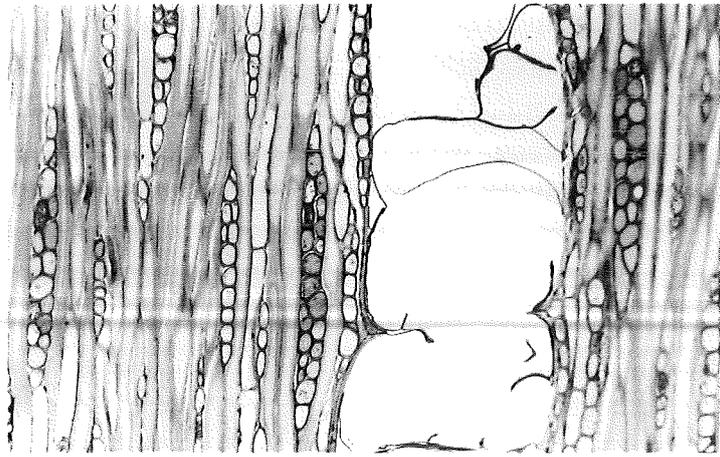


	1	2	3
Biegefestigkeit, tangential	21.2	23.1	24
Biegefestigkeit, radial	24.5	24.3	27
Druckfestigkeit in Faserrichtung	51.9	52.3	57.4
Schubfestigkeit in Faserrichtung	16.1	17.3	17

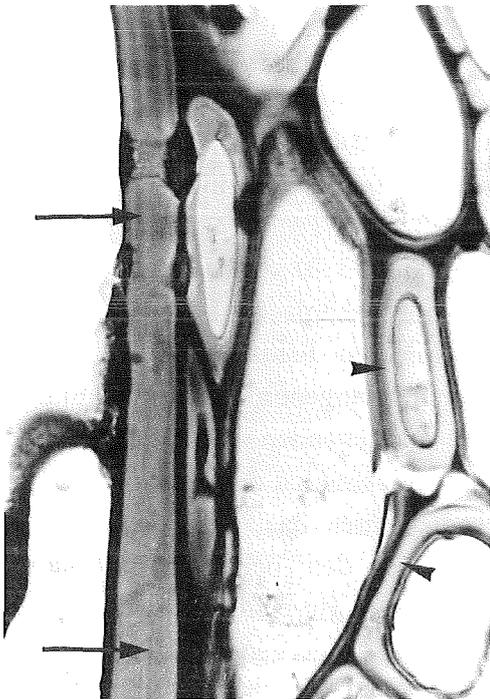
Abbildung 3.67: Gesamtansicht und Skizze des untersuchten Stammquerschnitts mit Orten der Bohrkernentnahme, Markierung der Druckseite (D), Windrichtung (Pfeil) sowie der Biegeachse von Baum 7 (*Eucalyptus globulus*). Die Zahlenwerte in der Tabelle geben die Mittelwerte der gemessenen Festigkeitskenngrößen in MPa an den entsprechenden Meßorten an. Die grau unterlegten Felder kennzeichnen hierbei die höchsten Werte je Festigkeitskenngröße.



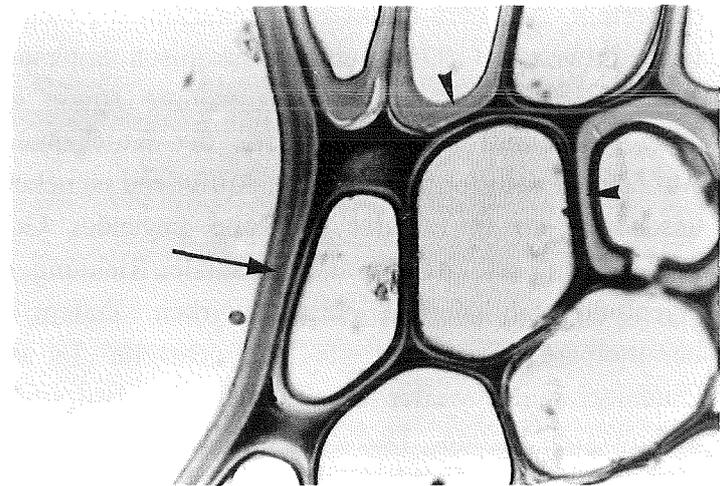
Querschnitt (x250)



Tangentialschnitt (x250)



Querschnitt (x1000)



Querschnitt (x1000)

Abbildung 3.68: Tangentialschnitt (x250) und Querschnitte (x250, x1000, x1000) von Baum 7 (*Eucalyptus globulus*) aus dem Stammbereich mit extremer Druckbelastung. Die Gefäßwände (Pfeile) sind hier teilweise doppelt so dick wie die Zellwände der benachbarten Längsfasern (Pfeilköpfe) (Lichtmikroskopische Aufnahmen: F. Schwarze).

3.7 Festigkeitsverteilungen im Bereich der Faserknickzone einer Eiche

Lokales Faserknicken ist eine relativ häufig zu beobachtende Erscheinung. Dem makroskopisch erkennbaren Faserknicken gehen im Initialstadium bleibender Verformungen feine Linien bzw. s-förmige Verbiegungen der Fibrillen und bei weiterer Belastungsdauer oder Drucksteigerung schließlich mikroskopisch erkennbare Stauchlinien voraus (vgl. Kap. 2.2.1). Die Knickzonen verlaufen dabei senkrecht zur Druckbelastung. Der Stammbereich mit teilweise geknickten Fasern ist hierdurch weicher und wirkt auf die Umgebung mechanisch ähnlich wie eine selektive Delignifizierung, worauf Bäume bei entsprechendem Ausmaß gemäß dem Axiom konstanter Spannung mit der Ausbildung einer Wulst reagieren (MATTHECK und BRELOER, 1994; GERHARDT, 1994). MATTHECK und BRELOER (1994) beschrieben scharf begrenzte, oft einseitige Beulen auf der druckbelasteten Seite als Symptome für lokales Faserknicken. Eine solche beulenartige Verdickung wies auch die nachfolgend beschriebene Eiche auf ihrer druckbelasteten Leeseite auf, die aufgrund der Vermutung einer Faserknickzone auf ihre Festigkeitsverteilungen hin untersucht wurde (Abbildung 3.69). Diese Vermutung konnte später bestätigt werden. Von Interesse war hierbei, welche Festigkeitsverteilung im fehlerfreien Stammbereich, im Reparaturanbau (Beule) und jeweils auf der gegenüberliegenden Seite vorliegt, um die Ursache des Faserknickens und die Reaktion des Baumes darauf bezüglich der Festigkeiten zu erhalten.

Hierzu wurden der Eiche jeweils auf der Beulenseite und der gegenüberliegenden Seite in vier verschiedenen Höhen Bohrkerne in radialer Richtung entnommen (je ober- und unterhalb der Beule im fehlerfreien Stammbereich sowie zwei im Bereich der Faserknickzone) und die Druckfestigkeit in Faserrichtung sowie die tangentiale und radiale Biegefestigkeit ermittelt. In Abbildung 3.69 sind die Ergebnisse der Festigkeitsmessungen und zwei Bilder der Eiche dargestellt. Aus dem dunkleren Querschnittsbereich wurden außerdem Proben entnommen und von SCHWARZE (1996) lichtmikroskopisch untersucht. Abbildung 3.70 zeigt nochmals den Querschnittsbereich der Probenentnahme sowie zwei lichtmikroskopische Aufnahmen im Tangentialschnitt (x63, x160) aus der Knickzone. Die geknickten Fasern sind in beiden Aufnahmen deutlich zu erkennen. Auffallend ist neben den üblichen tangentialen Ausknickungen besonders ein in radialer Richtung liegendes Gefäß samt umgebenden Längsfasern. Die Ausknickung erfolgte hier also in radialer Richtung, in der die Holzstrahlen den Ausknickungen eigentlich stabilisierend entgegenwirken. Zudem erweist sich hier das Gefäß und seine unmittelbare Umgebung als Schwachstelle. Es stellte sich bei den lichtmikroskopischen Untersuchungen weiter heraus, daß die Holzstrahlen in diesem Bereich weniger Lignin aufzuweisen hatten. Dadurch wurden wegen der zugweicheren Querverriegelung größere Verformungen und schließlich Ausknickungen in radialer Richtung ermöglicht.

Die gemessenen Festigkeitsverteilungen bestätigen die Beobachtungen der lichtmikroskopischen Untersuchungen (Abbildung 3.69). Auf der Rückseite (gegenüberliegende Seite der Beule) sowie auf der Beulenseite ober- und unterhalb der Beule betragen die tangentialen und radialen Biegefestigkeiten lediglich 50%, die Druckfestigkeiten in Faserrichtung etwa 25% der Werte wie sie an fehlerfreien Eichen ermittelt wurden. Dementsprechend waren auch die Festigkeitsverhältnisse von tangentialer bzw. radialer Biegefestigkeit zu Druckfestigkeit in Faserrichtung niedriger.

Bei den bereits vorgestellten Untersuchungen an hohlen Eukalyptusbäumen wurde gezeigt, daß diese Festigkeitsverhältnisse eines extrem druckbelasteten Baumes denen eines geraden und fehlerfreien Baumes entsprachen. Darüberhinaus wurde die Vermutung geäußert, daß bei Vorliegen der gleichen Belastungsart (Druckbelastung) und in diesem Fall auch größten Versagensgefahr (Faserknicken) gleiche Festigkeitsverhältnisse optimal sind. Würde dies zutreffen, so könnte bei der untersuchten Eiche aufgrund der deutlichen Abweichungen der Festigkeitsverhältnisse im Vergleich zu denen an geraden und fehlerfreien Eichen das Entstehen der Faserstauchung nur aufgrund der Kenntnis der Festigkeiten „erklärt“ bzw. die Gefahr des Faserknickens vorausgesagt werden. Dazu bedarf es jedoch weiterer, umfangreicher Untersuchungen.

Auf der Beulenseite im Bereich der Beule waren die Werte aller untersuchten Festigkeitskenngrößen merklich höher. Vor allem die Werte der radialen Biegefestigkeit lagen in diesem Bereich erheblich über den Werten auf der Rückseite bzw. auf der Beulenseite im fehlerfreien Bereich (bis zu 300%). Die Eiche reagierte also nicht nur durch einen Reparaturanbau in Form einer einseitigen Beule auf lokales Faserknicken, sondern erhöhte auch spürbar dessen Materialqualität. Die einzelnen Festigkeitskenngrößen wurden dabei nicht willkürlich gesteigert, sondern in unterschiedlichem Maße. Die Druckfestigkeit in Faserrichtung erfuhr nur eine relativ geringe Erhöhung, da zum einen gemäß dem Axiom konstanter Spannung eine Beule gebildet wurde und zum anderen die Faserknickzone sicher immer noch tragfähiger war als eine Höhlung. Die tangentiale bzw. radiale Biegefestigkeit ist vermutlich wegen der hohen Quersugbelastungen infolge der tangentialen und radialen Ausknickungen drastisch erhöht worden. Die festgestellte Belastungssituation entspricht prinzipiell der von Baum 3 bei den Untersuchungen an Eukalyptusbäumen. Die zudem vergleichbare Festigkeitsverteilung des intakten Holzes läßt auch hier vermuten, daß bei ähnlichen Belastungssituationen ähnliche Reaktionen von Bäumen bzgl. ihrer Festigkeitsverteilungen erfolgen. Schließlich bleibt festzuhalten, daß erneut eine last- und richtungsabhängige Verteilung der Festigkeiten zu beobachten war.

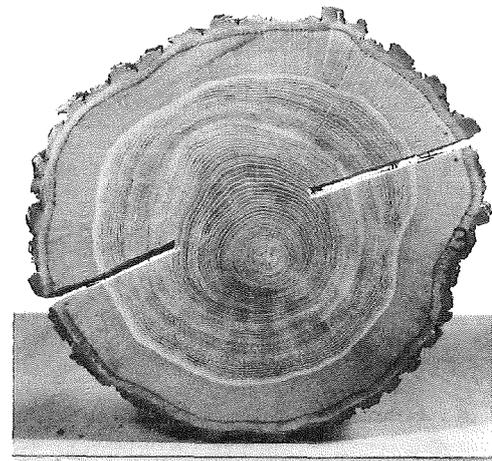
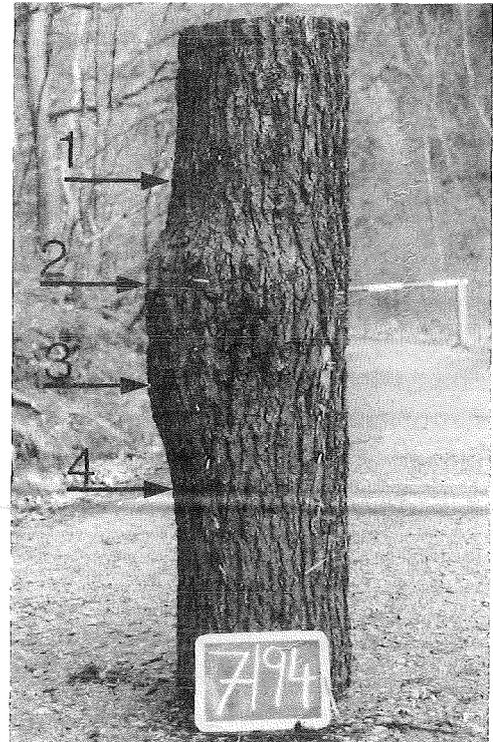
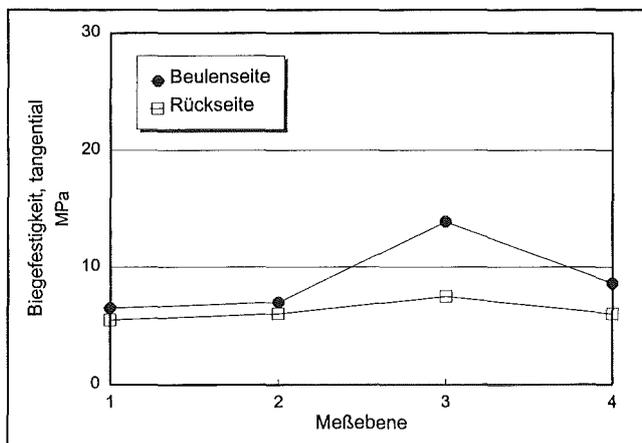
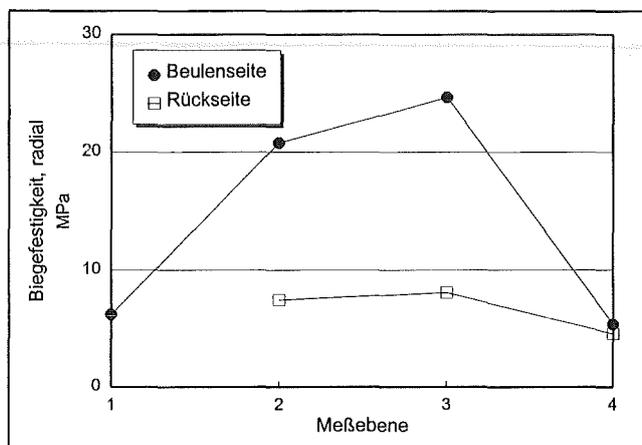
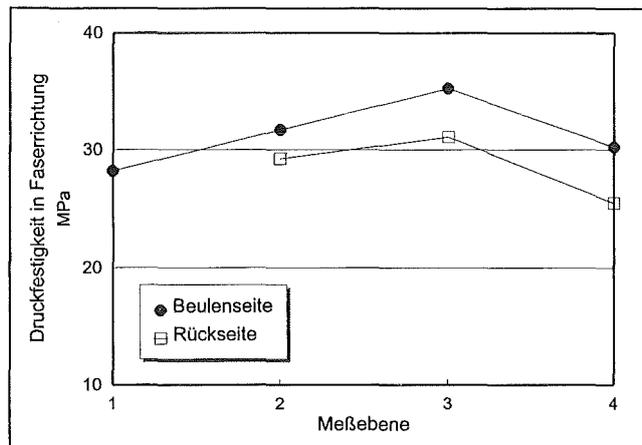
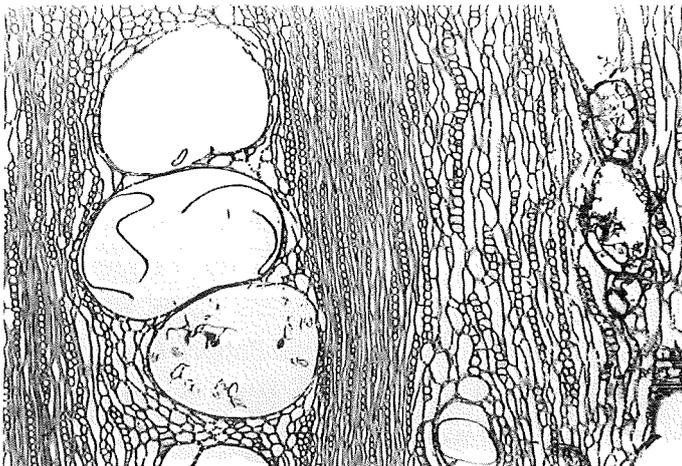


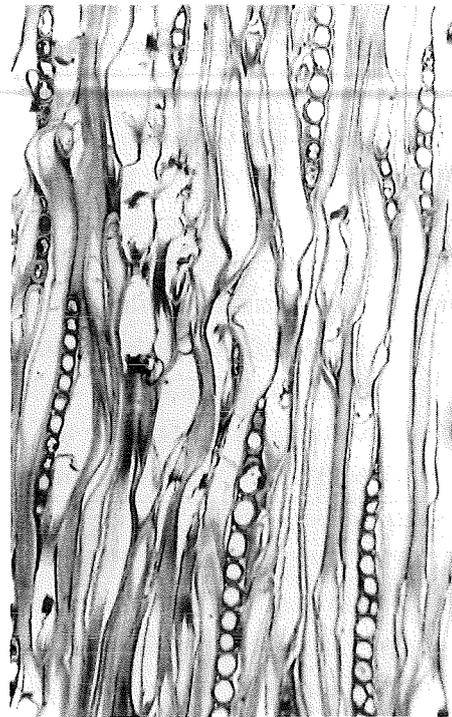
Abbildung 3.69: Mittelwerte der tangentialen und radialen Biegefestigkeit sowie der Druckfestigkeit in Faserrichtung einer Eiche mit lokalem Faserknicken. Die Pfeile in der Gesamtansicht der Eiche markieren die Höhe der Probenentnahmestellen auf der Beulen- und Rückseite, im dunkel gefärbten Bereich des Querschnitts wurde Faserknicken festgestellt.



a. Ausschnitt einer Stammscheibe mit Faserknickzone (dunkel gefärbter Bereich)



b. Tangentialschnitt (x63)



c. Tangentialschnitt (x160)

Abbildung 3.70: Aufnahmen im Bereich der Faserknickzone einer Eiche.

a. Vergrößerter Ausschnitt der Faserknickzone.

b. Tangentialschnitt: Lumen eines weitlumigen Gefäßes, das quer zur Faser ausgerichtet ist (x63).

c. Tangentialschnitt: Knickzonen in den Zellwänden von Librifasern (x160).
(Lichtmikroskopische Aufnahmen: F. Schwarze).

3.8 Festigkeitsverteilungen am Beispiel einer absinkenden Pappel

Als abschließendes Beispiel von Festigkeitsverteilungen in Bäumen wurde eine absinkende Pappel untersucht. Die höhere Belastung schiefer Bäume führt bei keiner ausreichenden Reaktionsholzbildung oder Erhöhung der Festigkeiten zu Kriechvorgängen im Holz. MATTHECK und BRELOER (1994) interpretierten als Entstehungsursache für das Absinken schiefgestellter Bäume die nachlassende Zugwirkung des Zugholzes bei Laubbäumen aufgrund von Wasserverlust bei hoher Hitze oder einer nachlassenden Vitalität. Das Absinken äußert sich durch Rindenstauchung auf der Druckseite und Rindenabplatzung auf der Zugseite. Im weiteren Verlauf des Absinkens bildet sich dadurch auf der Zugseite ein nacktes Dreieck oder Schubrisse entlang der neutralen Faser der Biegung. MATTHECK und BRELOER (1994) bezeichneten die Rinde als den Reißlack von Bäumen und demzufolge als den empfindlichsten mechanischen Indikator für lokal hohe Spannungen.

In dem hier vorgestellten Beispiel einer absinkenden Pappel fanden sich die zuvor beschriebenen Symptome einer Rindenstauchung auf der Druckseite und nacktem Dreieck auf der Zugseite. Abbildung 3.71 zeigt je eine Gesamtansicht der Pappel von der Zugseite und von einer um 90° versetzten Seite sowie zwei Zeichnungen mit den vorgefundenen Rindensymptomen. Es wurden zur Überprüfung der Festigkeitsverteilungen auf der Druck- und Zugseite sowie auf einer dazu um 90° versetzten Seite jeweils an zwei Bohrkernen die radiale Biegefestigkeit und die Druckfestigkeit in Faserrichtung ermittelt. In Abbildung 3.72 sind die Ergebnisse dieser Messungen als Mittelwerte entlang eines Bohrkernes je Seite dargestellt. Es zeigte sich, daß beide Festigkeitskenngrößen auf allen Seiten ungefähr gleich groß waren. Insbesondere fand auf der Druckseite keine Erhöhung der Festigkeiten statt, welche bei windexponierten oder schiefen Bäumen beobachtet wurde (vgl. Kap. 3.5). Die Festigkeiten waren jedoch im Vergleich zu geraden Pappeln nicht geringer. Vermutlich rührte die Ursache des Absinkens daher, daß nach einer erfolgten Schiefstellung merklich größere Belastungen vorlagen. Die Pappel konnte sich wegen ihres beträchtlichen Stammquerschnitts nicht wieder aufrichten, ebenso wurde auf der Druckseite keine verbesserte Materialqualität erzeugt. Ein weiteres Absinken war die Folge, ersichtlich anhand des nackten Dreiecks auf der Zugseite.

Es gibt also durchaus Fälle, bei denen keine optimale last- und richtungsabhängige Verteilung der Festigkeiten erfolgt. Die Konsequenz aus der Vernachlässigung einer Gestaltanpassung (Axiom konstanter Spannung) bzw. keine last- und richtungsabhängige Festigkeitsverteilungen auszubilden, ist für diese Pappel sehr wahrscheinlich das frühzeitige mechanische Versagen.

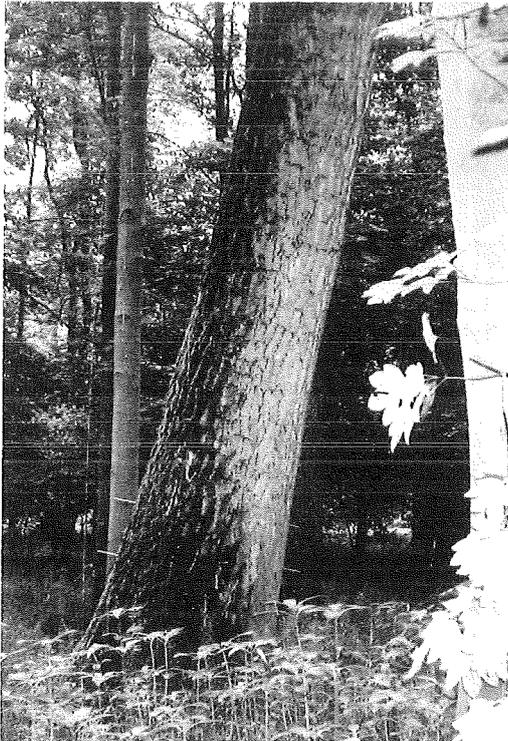
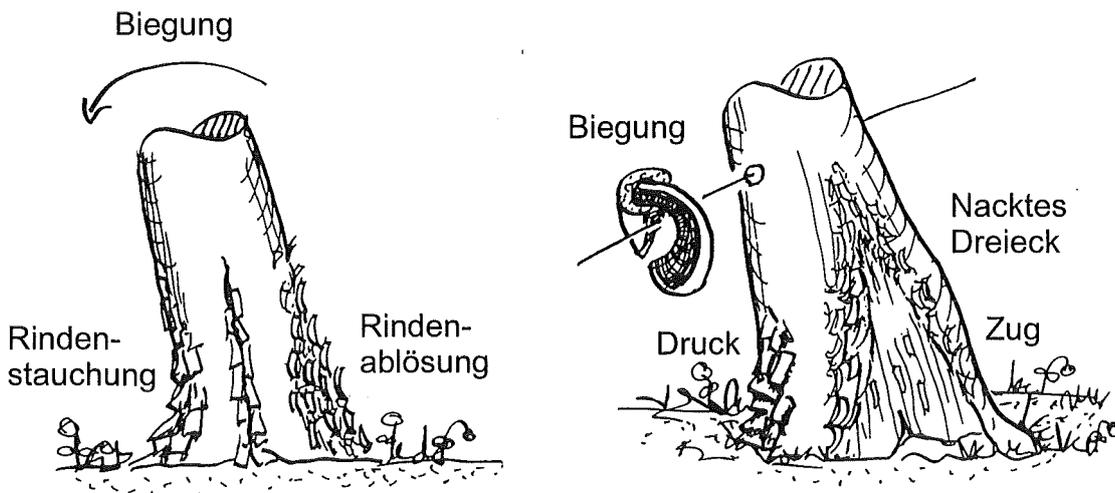


Abbildung 3.71: Zugseite und eine um 90° versetzte Seite einer absinkenden Pappel mit Rindenstauchungen auf der Druckseite und Rindenabplatzungen auf der Zugseite.

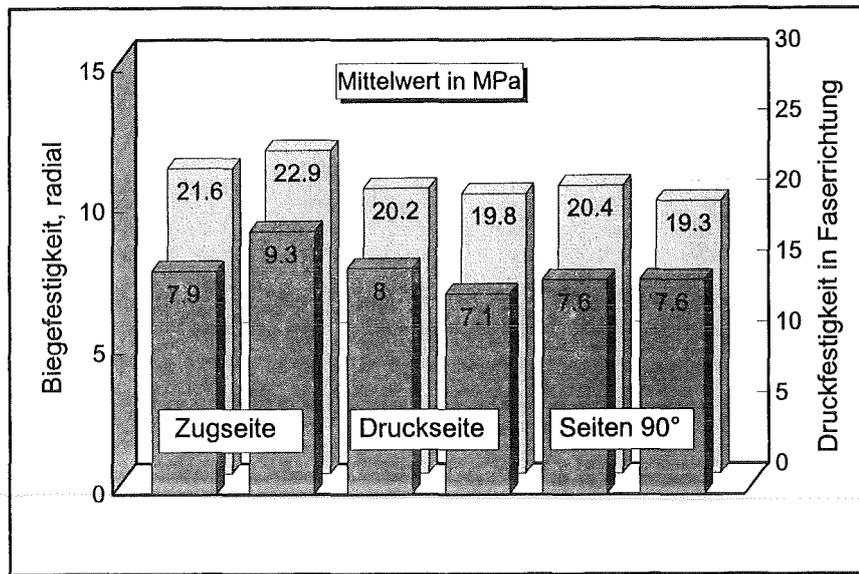


Abbildung 3.72: Mittelwerte der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung von je zwei Bohrkernen pro Seite einer absinkenden Pappel.

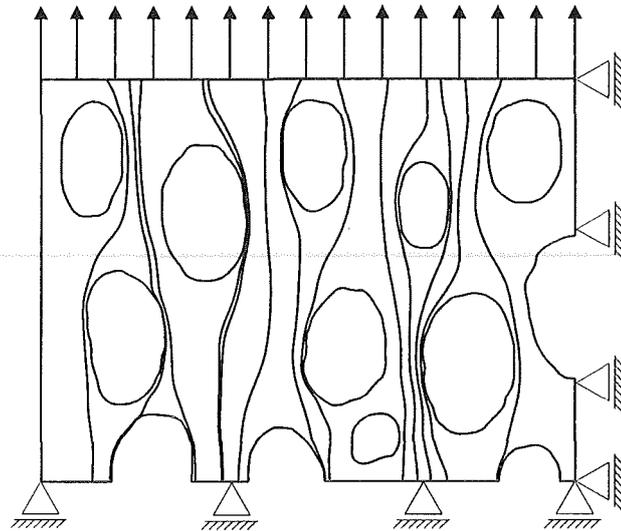
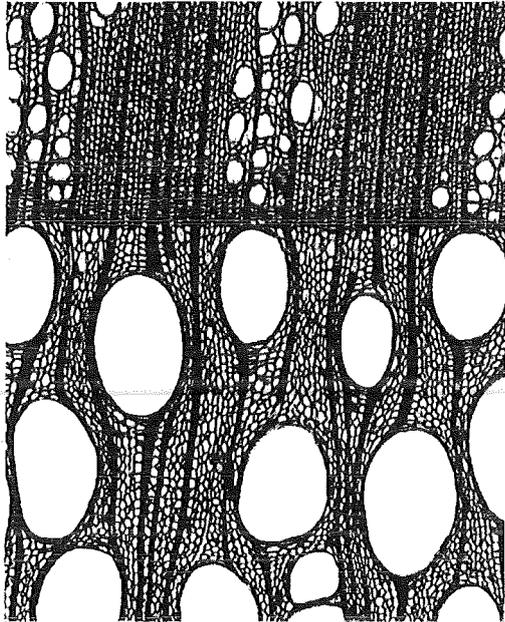
3.9 Simulation der Holzstrahlanordnung mittels der CAIO-Methode

Die Orientierung der Längsfasern eines Baumes wurde bereits intensiv untersucht. Es stellte sich heraus, daß Bäume ihre Längsfasern¹⁵ weitgehend parallel zu den Hauptspannungstrajektorien anordnen und damit gefährliche Schubspannungen zwischen den Fasern vermeiden (vgl. Kap. 2.1.2). Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurde im Forschungszentrum Karlsruhe mit der CAIO-Methode ein Berechnungsverfahren entwickelt, das durch iterative Umorientierung der Materialeigenschaften auch für beliebige technische Faserverbundbauteile die Möglichkeit bietet eine nahezu schubspannungsfreie Anordnung der Fasern zu erzielen (MATTHECK et al., 1994a; KRIECHBAUM, 1994; TESCHNER und GRÄBE, 1996).

Die Wichtigkeit der radial im Holzkörper verlaufenden Holzstrahlen zur Querverriegelung der Längsfasern warf nun die Frage auf, ob auch die Holzstrahlen weitgehend schubspannungsfrei orientiert sind. Hierzu wurde mittels der CAIO-Methode die schubspannungsfreie Materialorientierung (radiale Anordnung der Holzstrahlen) in einem vorgegebenem Querschnitt einer Edelkastanie berechnet und mit dem tatsächlichen Verlauf der Holzstrahlen verglichen. Als Vorlage für das Finite-Elemente-Modell diente der Querschnitt (Frühholz) einer Edelkastanie (*Castanea sativa* Miller) bei 40facher Vergrößerung (SCHWEINGRUBER, 1990). Die Materialdaten wurden aus LAVERS (1983) sowie U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987) entnommen und die Rechnung erfolgte linear-elastisch bei ebenem Dehnungszustand. Die Struktur wurde entsprechend den realen Gegebenheiten im Baum in radialer Richtung durch eine Flächenlast auf Zug belastet. Da die genaue Belastung in tangentialer Richtung nicht bekannt war, wurde auf eine zusätzliche Lastaufbringung in dieser Richtung verzichtet. Das FE-Modell sowie Belastung und Randbedingungen sind in Abbildung 3.73 skizziert, daneben ist eine lichtmikroskopische Aufnahme (x40) des realen Querschnitts dargestellt. Das Ergebnis der CAIO-Berechnung und anschließender Visualisierung ist in Form von Stromlinien bereits in das FE-Modell eingezeichnet. Es erfolgte nach zwei Iterationen eine Reduktion der maximalen Schubspannungen um 96%. Die berechneten Richtungsvektoren der Materialeigenschaften wurden mit Hilfe des Datenvisualisierungsprogrammes TECPLOT als Stromlinien miteinander verbunden. Dabei wurden genauso viele Stromlinien eingezeichnet, wie Holzstrahlen im realen Querschnitt vorhanden waren. Um eine Stromlinien zu erzeugen, muß bei TECPLOT nur ein Punkt in der Struktur ausgewählt werden. Diese Punkte wurden so plaziert, daß sie jeweils Bestandteil eines Holzstrahls im realen Querschnitt gewesen wären. Die so gewonnenen Stromlinien waren also nahezu schubspannungsfrei, d.h. die einzelne Stromlinie folgte jeweils dem Verlauf der dort vorliegenden, größten Hauptnormalspannung (Zugspannung). Da nun der Verlauf der Holzstrahlen im realen Querschnitt ungefähr dem Verlauf der Stromlinien in der berechneten Struktur entsprach, kann hier ebenfalls eine schubspannungsfreie Anordnung der Holzstrahlen in radialer Richtung vermutet werden. Damit würde die mechanische Bedeutsamkeit der Holzstrahlen weiter untermauert und ein weiteres Beispiel der inneren Optimierung von Bäumen bereitgestellt. Um dies jedoch gesichert behaupten zu können, wären weitere derartige Untersuchungen vor allem in unterschiedlich belasteten Stammbereichen erforderlich.

¹⁵ Unter dem Begriff Längsfasern sind hier alle Zellen zusammengefaßt die parallel zur Sproßachse ausgerichtet sind, z.B. Tracheiden und Librifasern.

Edelkastanie (*Castanea sativa* Miller)



Querschnitt bei 40facher Vergrößerung
mit Übergang von Spätholz (oben) zu
Frühholz (unten)

Reduktion der maximalen
Schubspannung um 96%

Abbildung 3.73: Querschnitt einer Edelkastanie (*Castanea sativa* Miller) sowie die mittels der CAIO-Methode vorhergesagten Verläufe der Holzstrahlen im Falle einer Minimierung der Schubspannungen.

4 Zusammenfassung

Festigkeitsmessungen an geraden und fehlerfreien Bäumen sowie an Bäumen mit Abweichungen von der Normalgestalt zeigten, daß die untersuchten Bäume ihre Festigkeiten last- und richtungsabhängig verteilten. Zusammen mit der optimalen Verteilung der Wachstums- und schubspannungsfreien Faserorientierung der Längsfasern würde eine derartige lastabhängige Festigkeitsverteilung die Optimierung der inneren Baumstruktur vervollständigen und somit eine ideale Ergänzung zu der bekannten äußeren Gestaltoptimierung von Bäumen darstellen. Bäume wären damit in der Lage mit allen ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln dem mechanischen Versagen zu begegnen. In Verbindung mit einer genaueren Untersuchung der Detektierung von Belastungszuständen und der Umsetzung von Festigkeitsanpassungen auf mikroskopischer, fibrillärer und zellulärer Ebene wäre ein weiterer Schritt zum Verständnis des Aufbaus von Bäumen vollzogen. Darüber hinaus liefert die Natur eine wertvolle Hilfestellung zur Verbesserung von Faserverbundwerkstoffen oder Entwicklung neuartiger Materialien.

Herkömmliche Verfahren zur Festigkeitsbestimmung von Holz waren nicht geeignet die notwendigen Messungen zu realisieren. Hierzu war es erforderlich am grünen Baum lokal Festigkeitskenngrößen an kleinen Proben ermitteln zu können. Die Normprüfverfahren fordern jedoch nahezu ausnahmslos große Proben die zunächst aufwendig hergestellt werden müssen und zwar für jede Kenngröße eine andere Probenform. Mit diesen Proben wäre eine lokale Messung und anschließende Gegenüberstellung der gemessenen Festigkeiten an nahezu der gleichen Stelle nicht möglich gewesen. Ferner wurde an einer Querkzugprobe gezeigt, daß diese im Versagensbereich Kerbspannungen besaß, die zudem noch von dem Verhältnis der E-Moduli in Längs- und Querrichtung abhängig waren. Die Festigkeitsmessungen wurden deshalb mit Hilfe des Fractometer II bzw. III durchgeführt (vgl. Kapitel 2). Die mit dem Fractometer an Bohrkernen mit 5 mm Durchmesser ermittelten Festigkeitskenngrößen waren die Druckfestigkeit in Faserrichtung, die tangentiale und radiale Biegefestigkeit sowie die Schubfestigkeit. Die Druckfestigkeitsbestimmung mit Hilfe des Fractometer wurde mittels einer Finite-Elemente-Rechnung und mehreren Vergleichsmessungen an quaderförmigen Proben abgesichert bzw. mit Literaturangaben verglichen. Für die Biegefestigkeiten erfolgte wegen fehlender Normprüfverfahren bzw. Normprüfverfahren mit kerbspannungsbehafteten Querkzugproben keine derartigen Vergleichsmessungen. Es wurden an dieser Stelle deshalb lediglich zwei verschiedene Möglichkeiten zur Messung der tangentialen Biegefestigkeit mit dem Fractometer II und III gegenübergestellt. Aufgrund von Versagensbeobachtungen und der durchgeführten Berechnungen wurde das Vorliegen eines Biegebruchs bei der Prüfung der tangentialen Biegefestigkeit an einer dünnen Scheibe bestätigt.

Um unabhängig von Literaturangaben Festigkeitswerte von grünem Holz zu erhalten, wurden zunächst die Festigkeitskenngrößen und Festigkeitsverhältnisse von 16 verschiedenen Baumarten mit geraden und fehlerfreien Stämmen bestimmt. Es stellte sich heraus, daß bei Laubbäumen eine Korrelation zwischen radialer Biegefestigkeit und Druckfestigkeit in Faserrichtung vorlag, bei Nadelbäumen hingegen nicht. Weiter wurde vor allem eine deutliche Abhängigkeit der radialen Biegefestigkeit, aber auch in etwas abgeschwächter Form der tangentialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung vom Holzstrahlanteil am Gesamtvolumen gefunden. Außerdem stellte sich heraus, daß Bäume mit ähnlichem anatomischem Aufbau (Gefäßanordnung, Holzstrahlanteil) ähnliche Festigkeitsrelationen

besaßen und dadurch eine Klassifizierung möglich war. Aufgrund der bei den Untersuchungen an geraden und fehlerfreien Bäumen gewonnenen Werte der Festigkeitskenngrößen war es bei weiteren Messungen möglich, zwischen „normalen“ Festigkeitswerten und Festigkeitsrelationen und solchen, die infolge von Abweichungen von der Normalgestalt resultierten, zu unterscheiden. Um herauszufinden, inwieweit Bäume ihre Festigkeiten last- und richtungsabhängig verteilen, wurden windexponierte, schiefe, gekrümmte sowie hohle Bäume bezüglich ihrer Festigkeitsverteilungen untersucht.

Bei gekrümmten Buchen, die eine Belastung in Richtung einer Begradigung erfuhren, wurde im Bereich der schärfsten Krümmung auf der Zugseite eine Erhöhung der radialen Biegefestigkeiten festgestellt, die bereits von ALBRECHT (1995) an einer Vielzahl krummer Baumteile entdeckt wurde. Die Ausprägung der Erhöhung war dabei eindeutig vom Krümmungsgrad abhängig und damit von der Gefahr der Spaltung durch Quersugversagen (ZIPSE et al., 1994). Auf der Druckseite waren erhöhte Werte der radialen Biegefestigkeit und der Druckfestigkeit in Faserrichtung vorhanden. Dies ist durchaus nachvollziehbar und stellt keine Verletzung einer richtungsabhängigen Festigkeitsverteilung dar, weil die für die radiale Biegefestigkeit wichtigen Holzstrahlen bei Druckbelastung Ausknickungen in radialer Richtung verhindern. In der gleichen Art und Weise gekrümmte Douglasien verhielten sich prinzipiell wie die Buchen. Unterschiede gab es lediglich auf der Druckseite, dort waren die Festigkeiten in einem Streifen, der direkt dem Markstrang zur konvexen Seite folgte, besonders hoch. Gewollt oder ungewollt - in jedem Fall zu ihrem Vorteil - beugen Nadelbäume damit dem in der Nähe des Markstranges besonderen Risiko der Querspaltung oder des Schubversagens vor. Weiter wurden ausgeprägte Wurzelanläufe auf der Zugseite von geraden Fichten untersucht. Es lagen erneut im Bereich der schärfsten Krümmung hohe radiale Biegefestigkeiten vor, aber keine hohen Druckfestigkeiten. Es wurde also bei gekrümmten Baumteilen eine eindeutige last- und richtungsabhängige Verteilung der Festigkeiten vorgefunden. Windexponierte und teilweise schiefe, schottische Buchen wiesen jeweils leeseitig höhere radiale Biegefestigkeiten und Druckfestigkeiten in Faserrichtung auf als luvseitig. Bei geraden Bäumen war der Unterschied relativ gering, bei schiefen Bäumen wurden teilweise deutlich höhere Werte ermittelt. Hierdurch wurde wiederum die Zweckmäßigkeit einer Erhöhung der radialen Biegefestigkeit bestätigt.

Hohle Bäume bergen wegen der Gefahr des Beulens bzw. Knickens ein besonderes Versagensrisiko in sich, dies betrifft vor allem Bäume mit dünnen Restwandstärken. Bei einheimischen, hohlen und geraden, aber dickwandigen Bäumen wurden kaum Festigkeitserhöhungen festgestellt, lediglich sanken die radialen Biegefestigkeiten mit zunehmender Höhe nicht so stark wie bei fehlerfreien Bäumen. Waren die hohlen Bäume zusätzlich schief, so drückte sich dies immer in einer Erhöhung der Druckfestigkeiten und meist auch radialen Biegefestigkeiten aus. Diese erhöhten sich merklich bei Vorliegen eines offenen Querschnitts. An einer äußerst dünnwandigen Pappel konnten nicht nur auf der Druckseite hohe Festigkeiten nachgewiesen werden, sondern auch an um 90° versetzten Stellen wurde einer Querschnittsverflachung bzw. Zerbretterung des beulgefährdeten Querschnitts durch Ausbildung erhöhter Querfestigkeiten optimaler Widerstand geleistet. An einer Esche, die aufgrund eines hohlen Wurzelstocks eine beträchtliche Fußglocke mit teilweise offenem Querschnitt bildete, wurden sowohl im hohlen als auch im vollen Stammbereich die radialen Biegefestigkeiten und Druckfestigkeiten in Faserrichtung ermittelt und gegenübergestellt. Bei den Druckfestigkeiten im hohlen und fehlerfreien Stammbereich traten keine Unterschiede auf, dahingegen lagen die

radialen Biegefestigkeiten im hohlen Stammbereich erheblich höher im Vergleich zum fehlerfreien. Die Querschnittsfläche entsprach im hohlen Bereich der im fehlerfreien und das Widerstandsmoment war im hohlen Bereich sogar deutlich höher. Es waren somit keine erhöhten Druckfestigkeiten nötig, weil auch keine erhöhte Druckbelastung vorlag. Dort erforderten der offene Querschnitt und aufgrund der Fußglocke entstandene Querkraft eine bessere Querverriegelung und damit höhere radiale Biegefestigkeiten wie im fehlerfreien Stammabschnitt. Die an heimischen, hohlen und schiefen Bäumen beobachteten Festigkeitsverteilungen konnten bei Untersuchungen an hohlen Eukalyptusbäumen mit offenen Querschnitten untermauert werden. Zusätzlich wurden dort immer die tangentielle Biegefestigkeit und die Schubfestigkeit bestimmt. Diese beiden Festigkeitskenngrößen erhöhten sich an diesen Stellen, wo die dazugehörigen Belastungsgrößen, also hohe Querkraftspannungen oder Schubspannungen, vorlagen. Diese Erhöhung erfolgte zumeist gleichzeitig, da zur Ausbildung dieser beiden Festigkeiten ähnliche Mechanismen verantwortlich sein dürften. Am erheblich druckbelasteten Teil eines Eukalyptusbaumes wurden äußerst hohe tangentielle und radiale Biegefestigkeiten sowie Druckfestigkeiten in Faserrichtung ermittelt. Die Festigkeitsverhältnisse blieben aber gegenüber geraden und fehlerfreien Eukalyptusbäumen der gleichen Art erhalten. Dies ließ vermuten, daß auch gerade und fehlerfreie Bäume Festigkeitsverhältnisse besitzen, die für eine Druckbelastung optimal sind. Lichtmikroskopische Untersuchungen zeigten, daß dieser Baum mehr als doppelt so dicke Gefäßwände ausbildete als andere Bäume seiner Art und damit eine Schwachstelle bei Druckbelastung eliminierte.

Einer Eiche mit einer lokalen Faserknickzone konnten außer im Bereich des Reparaturanbaus vor allem niedrige Querfestigkeiten, aber auch etwas geringere Druckfestigkeiten nachgewiesen werden, die somit die Ursache für das Faserknicken gewesen sein dürften. In dem Bereich der Faserknickzone bildete sich eine Beule. Dieser Reparaturanbau des Baumes besaß merklich erhöhte Festigkeiten und verstärkte hierdurch die vorhandene Schwachstelle.

Als abschließendes Beispiel wurden an einer absinkenden Pappel mit deutlichen Rindenstauchungen auf der Druckseite und Rindenabplatzungen auf der Zugseite keine Festigkeitserhöhungen auf irgendeiner Seite des Baumes festgestellt. Der Baum war vermutlich wegen einer nachlassenden Vitalität nicht in der Lage, durch eine last- und richtungsabhängige Festigkeitserhöhung der Schiefstellung entgegenzuwirken. Die Rindensymptome erbrachten den Beweis für das zu erwartende frühzeitige Versagen dieses nicht festigkeitsoptimierten Baumes. Es wurde somit an zahlreichen fehlerbehafteten Bäumen verschiedenster Art eine last- und richtungsabhängige Verteilung der Festigkeiten gefunden und an einem Beispiel demonstriert, daß Bäume ohne eine derartige Optimierung eher versagensgefährdet sind.

Eine CAIO-Simulation der radialen Anordnung von Holzstrahlen läßt schließlich die Vermutung einer den Längsfasern äquivalenten, schubspannungsfreien radialen Holzstrahlorientierung zu. Um eine gesicherte Aussage hierüber treffen zu können, bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen.

Bäume nutzen also alle Möglichkeiten dem mechanischen Versagen zu widerstehen und sind somit meisterliche Vorbilder einer lastgerechten Leichtbauweise. Technische Bauteile werden die konstruktive Perfektion der Bäume zwar nie erreichen, aber schon einige der Ideen der Natur in die Technik zu übertragen und dadurch „Technisches Holz“ entwickeln zu können, wäre ein großer Erfolg.

5 Literatur

- [1] ALBRECHT, W., BETHGE, K., MATTHECK, C. (1995) *Is lateral strength in trees controlled by lateral stress?* Journal of Arboriculture 21, S. 83-87.
- [2] ALBRECHT, W. (1995) *Untersuchung der Spannungssteuerung radialer Festigkeitsverteilung in Bäumen*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [3] ARCHER, R.R. (1987) *Growth stresses and strains in trees*. Springer Verlag, New York.
- [4] BEITZ, W., KÜTTNER, K.-H. (1987) *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 16. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, New York, Tokyo.
- [5] BETHGE, K., MATTHECK, C., MCDONALD, K. A., CRAMER, S. M. (1992) Unveröffentlichter Bericht des Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
- [6] BETHGE, K., MATTHECK, C., ZIPSE, A. (1994) *Die Festigkeiten im Baum und ihre Bestimmung mit dem Fractometer II*. Neue Landschaft 12, S. 920-926.
- [7] BRAUN, H. J. (1988) *Bau und Leben der Bäume*. 3. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg.
- [8] BRAUNS, F. E. (1952) *The chemistry of lignin*. Academic Press, New York.
- [9] BRONSTEIN, I. N., SEMENDJAJEW, K. A. (1983) *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt a. Main.
- [10] CURREY, J. (1984) *The mechanical adaptation of bones*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- [11] DELORME, A., VERHOFF, S. (1975) *Zellwanddeformationen in sturmgeschädigtem Fichtenholz unter dem Rasterelektronenmikroskop*. Holz als Roh- und Werkstoff 33, S. 456-460.
- [12] DIETRICH, F. (1995) *Wie der grüne Baum tangentielle Zugbelastungen bewältigt*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [13] DIETRICH, F., MATTHECK, C. (1995a) *Cracks in sabre-shaped trees and branches*. Journal of Theoretical Biology 173, 321-327.
- [14] DIETRICH, F., MATTHECK, C. (1995b) *Wachstumsspannungen und ihre Bedeutung bei der Vermeidung von Rissen in grünen Bäumen*. Berichtsband zur 27. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge in Köln, DVM e.V., Berlin, S. 431-440.
- [15] DINWOODIE, J. M. (1981) *Timber its nature and behaviour*. Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., New York, USA.
- [16] FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG (1976) Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuß Holz, DIN 52185, *Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser*, Beuth Verlag, Berlin.
- [17] FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG (1979a) Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuß Holz, DIN 52188, *Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser*, Beuth Verlag, Berlin.

- [18] FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG (1979b) Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuß Holz, DIN 52187, *Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung*, Beuth Verlag, Berlin.
- [19] FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG (1979c) Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuß Holz, DIN 52192, *Druckversuch quer zur Faserrichtung*, Beuth Verlag, Berlin.
- [20] FEMGEN/FEMVIEW (1991) *Femgen/Femview User's Manual*. Femview Limited, Leicester, Großbritannien.
- [21] FREY-WYSSLING, A. (1938) *Die mikroskopische Holzstruktur bei technischer Überbeanspruchung*. Schweiz. Verband für die Materialprüfungen in der Technik, Bericht Nr. 36, Zürich, S. 23-32.
- [22] FREY-WYSSLING, A., STÜSSI, F. (1948) *Festigkeit und Verformung von Nadelholz bei Druck quer zur Faser*. Journal forestier suisse, Zürich, S. 106-114.
- [23] FREY-WYSSLING, A. (1953) *Über den Feinbau der Stauchlinien in überbeanspruchtem Holz*. Holz als Roh- und Werkstoff, 11 (7), S. 283-288.
- [24] GERHARDT, H. (1994) *Computersimulationen zum Wachstumsverhalten und zur Bruchmechanik von Bäumen*. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18, Nr. 149, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [25] GORDON, J. E. (1989) *Strukturen unter Stress*. Spektrum der Wissenschaft-Verlag, Heidelberg.
- [26] GROSSER, D. (1977) *Die Hölzer Mitteleuropas*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [27] GUTMANN, G. (1995) *Messung tangentialer Holzfestigkeiten mit Fractometer II und III*. Diplomarbeit am Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht.
- [28] HIBBITT, D., KARLSSON, B., SORENSEN, P. (1995) *ABAQUS User's Manual, Version 5.5*. Pawtucket, USA.
- [29] HÖTZEL, H.-J. (1996) *Schuldhaftige Verletzungen der Verkehrssicherungspflicht bei Bäumen - mehr Rechtssicherheit durch die Anwendung des Visual Tree Assessment (VTA) als neuentwickelter Methode der Baumkontrolle*. Agrarrecht, 26 (3), S. 77-82.
- [30] KISSER, J., FRENZEL, H. (1950) *Mikroskopische Veränderungen der Holzstruktur bei mechanischer Überbeanspruchung von Holz in Faserrichtung*. Schriftenr. d. Österr. Ges. f. Holzf., Wien, 2, S. 7-31.
- [31] KISSER, J., STEININGER, A. (1952) *Makroskopische und mikroskopische Strukturveränderung bei Biegebeanspruchung von Holz*. Holz als Roh- und Werkstoff, 10 (11), S. 415-421.
- [32] KLAUDITZ, W. (1952) *Zur biologisch-mechanischen Wirkung des Lignins im Stammholz der Nadel- und Laubhölzer*. Holzforschung, 6 (3), S. 70-82.
- [33] KNIGGE, W., SCHULZ, H. (1966) *Grundriß der Forstbenutzung*. Parey, Berlin.

- [34] KOLLMANN, F. (1956) *Untersuchungen über die Querkzugfestigkeit der Hölzer*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 75, S. 304-318.
- [35] KOLLMANN, F. (1982) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [36] KRIECHBAUM, R. (1994) *Ein Verfahren zur Optimierung der Faserverläufe in Verbundwerkstoffen durch Minimierung der Schubspannungen nach Vorbildern der Natur*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [37] KUBLER, H. (1959a) *Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannung quer zur Faserrichtung, 1. Teil*. Holz als Roh- und Werkstoff 17, S. 1-9.
- [38] KUBLER, H. (1959b) *Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannung quer zur Faserrichtung, 2. Teil*. Holz als Roh- und Werkstoff 17, S. 44-54.
- [39] LAVERS, G. M. (1983) *The strength properties of timber*. Building Research Establishment Report, 3rd Edition, Her Majesty's Stationery Office, London.
- [40] MARK, R. E. (1967) *Cell wall mechanics of tracheids*. Yale University Press, New Haven, London.
- [41] MATTHECK, C. (1990) *Engineering components grow like trees*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 21, S. 141-168.
- [42] MATTHECK, C. (1992a) *Design in der Natur - der Baum als Lehrmeister*. Rombach Verlag, Freiburg.
- [43] MATTHECK, C. (1992b) *Die Baumgestalt als Autobiographie. Eine Einführung in die Mechanik der Bäume und ihre Körpersprache*. 2. Auflage, Thalacker-Verlag, Braunschweig.
- [44] MATTHECK, C., BRELOER, H. (1994) *Handbuch der Schadenskunde - der Baumbruch in Mechanik und Rechtsprechung, 2. Auflage*. Rombach Verlag, Freiburg.
- [45] MATTHECK, C., BURKHARDT, S. (1990) *A new method of structural shape optimization based on biological growth*. Int. Journal of Fatigue 12, S. 185-190.
- [46] MATTHECK, C., BURKHARDT, S. (1991) *Der Unglücksbalken - Biomechanik eines inneren Versagensmechanismus von Bäumen*. Allg. Forst und Jagdzeitung 162, S. 170-174.
- [47] MATTHECK, C., KUBLER, H. (1995) *Wood - the internal optimization of trees*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [48] MATTHECK, C., SCHWARZE, F. W. M. R. (1994) *Die Holzstrahlen als getarnte I-Balken in einem mechanischen Ersatzmodell für Holz*. Allg. Forst und Jagdzeitung, 10/11, S. 197-201.
- [49] MATTHECK, C., ALBRECHT, W., DIETRICH, F., KRIECHBAUM, R. (1994a) *Die Biomechanik der Holzstrahlen*. Allg. Forst und Jagdzeitung, 8, S. 143-147.
- [50] MATTHECK, C., BETHGE, K., THUN, G. (1992) *Vorrichtung zur Ermittlung der Bruchfestigkeit von Prüfzylindern*. Patentschrift des Kernforschungszentrums Karlsruhe, Patent-Nr. DE-OS 42 28 843 (10.3.1994).

- [51] MATTHECK, C., BETHGE, K., WEST, P. W. (1994b) *Breakage of hollow trees stems*. *Trees: Structure and Function* 9, S. 47-50.
- [52] MATTHECK, C., BETHGE, K., ZIPSE, A., BAUMGARTNER, A. (1994c) *Holz-Bruchfestigkeiten: Bestimmung mit dem Fractometer II*. *Landschaftsarchitektur* 4, S. 55-57.
- [53] MATTHECK, C., BRELOER, H., BETHGE, K., ALBRECHT, W., ZIPSE, A. (1995) *Use of the Fractometer to determine the strength of wood with incipient decay*. *Journal of Arboriculture* 21 (3), S. 105-112.
- [54] MEIER, H. (1955) *Über den Zellwandabbau durch Holzvermorschungspilze und die submikroskopische Struktur von Fichtentracheiden und Birkenholzfasern*. *Holz als Roh- und Werkstoff* 13, S. 323-338.
- [55] METZGER, C. (1893) *Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachstum der Bäume*. *Mündener Forstliche Hefte, Drittes Heft*, Julius Springer-Verlag, Berlin.
- [56] MÜNCH, E. (1938) *Statik und Dynamik des schraubigen Baus der Zellwand*. *Flora* 32, Jena, S. 357-424.
- [57] MYER, J. E. (1922) *Ray volumes of the commercial woods at the United States and their significance*. *Journal of Forestry* 20, S. 337-351.
- [58] NIEMZ, P. (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen.
- [59] NULTSCH, W. (1974) *Allgemeine Botanik*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 5. überarb. Auflage.
- [60] ROBINSON, W. (1921) *The microscopical feature of mechanical strains in timber and the bearing of these on the structure of the cell wall in plants*. *Philos. Transact. of the Royal Soc. of London* 210, S. 49-82.
- [61] RUNKEL, R. O. H. (1951) *Neuere Forschungen auf dem Gebiet der Holzplastifizierung*. *Papierfabrikant* 5 (1/2), S. 3-12.
- [62] SCHWARZE, F. W. M. R. (1994) *Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzersetzenen Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro*. svk-Verlag, Erndtebrück.
- [63] SCHWARZE, F. W. M. R. (1996) Persönliche Mitteilung.
- [64] SCHWEINGRUBER, F. H. (1990) *Anatomie europäischer Hölzer*. Paul HauptVerlag, Stuttgart.
- [65] SELL, J., ZIMMERMANN, T. (1993) *Das Gefüge der Zellwandschicht S2 - Untersuchungen mit dem Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop an Querbruchflächen von Fichten- und Tannenholz*. *Forschungs- und Arbeitsberichte der EMPA* 115/28, Zürich.
- [66] STRASBURGER, E., NOLL, F., SCHENK, H., SCHIMPER, A. F. W. (1991) *Lehrbuch der Botanik*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-Jena-New York, 33. Auflage.
- [67] SUUNTO (1993) *Gebrauchsanleitung für Zuwachsbohrer*. Produktinformation der Fa. Suunto, Schweden.
- [68] TESCHNER, M., GRÄBE, D. (1996) Persönliche Mitteilung.

- [69] U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987) *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. Agricultural Handbook Nr. 72, U. S. Department of Agriculture, Washington, USA.
- [70] WAGENFÜHR, R., SCHEIBER, C. (1989) *Holzatlas*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [71] WARDROP, A. B., DADSWELL, H. E. (1947) *Contributions to the study of the cell wall. 5. The occurrence, structure and properties of certain cell wall deformations*. Commonwealth of Australia, Council for Sci. and Ind. Res., Bull. No. 221, S. 14-32.
- [72] WEBER, H. (1992) *Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik für Ingenieure*. 3. überarb. und erw. Aufl., Teubner-Verlag, Stuttgart.
- [73] WOLFF, J. (1869) *Über die Bedeutung der Architektur der spongiösen Substanz für die Frage von Knochenwachstum*. Centralblatt für die Wissenschaften, Nr. 54.
- [74] ZIMMERMANN, T., SELL, J., ECKSTEIN, D. (1994) *Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Zugbruchflächen von Fichtenholz*. Holz als Roh- und Werkstoff 52, S. 223-229.
- [75] ZIPSE, A., ALBRECHT, W., BETHGE, K., MATTHECK, C. (1994) *Fractometer and Metriguard stress wave timer - handy wood testing devices for tree assessment*. Proceedings of the XIII IMEKO WORLD CONGRESS, Turin, Sept. 5-9, 1994, Proc. Vol. 3, S. 2139-2144.
- [76] ZIPSE, A., MATTHECK, C., BETHGE, K. (1995) *Festigkeitsrelationen im grünen Baum*. Allg. Forst und Jagdzeitung 11, S. 215-222.
- [77] ZIPSE, A., ALBRECHT, W., MATTHECK, C. (1996) *Wie das Holz hohler und schiefer Bäume dem Versagen widersteht*. Erscheint demnächst in der Allg. Forst und Jagdzeitung.
- [78] ZIPSE, A., MATTHECK, C., GRÄBE, D., GARDINER, B. (1996) *The effect of wind on the mechanical properties of wood in Scottish beech trees*. Erscheint demnächst in Scottish Forestry Abstracts.