

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5634

Untersuchung der Spannungssteuerung radialer Festigkeitsvertei- lung in Bäumen

W. Albrecht

Institut für Materialforschung
Projekt Energie- und Stoffumsetzungen in der Umwelt

September 1995

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5634

Untersuchung der Spannungssteuerung radialer
Festigkeitsverteilung in Bäumen.*

Wolfgang Albrecht

Institut für Materialforschung
Projekt Energie- und Stoffumsetzungen in der Umwelt

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

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1995

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

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Untersuchung der Spannungssteuerung radialer Festigkeitsverteilung in Bäumen.

Zusammenfassung

Durch Vermessen der radialen Biegefestigkeiten des Holzes mit einem Fractometer konnte an zahlreichen Bäumen eine Querspannungsverteilung nachgewiesen werden, die der berechneten Querspannungsverteilung (unter Biegebelastung) gleicht.

Bäume schützen ihren aus Längs- und Radialfasern aufgebauten Holzkörper durch eine spannungsgesteuerte, an die Betriebsbelastung angepaßte, radiale Festigkeitsverteilung gegen Delamination der Längsfasern.

Theoretische Untersuchungen zeigten, daß während des alljährlichen Dickenzuwachses der Bäume sich die Querspannungsverteilung und somit die Festigkeitsverteilung im Bauminneren verändert. Die lokalen Maxima der Verteilungen wandern durch den Holzkörper in gleichem Maße wie der Baum radial zuwächst.

Bäume, deren Holz durch Fäule abgebaut wurde, tragen dieser Querschnittsschwächung durch erhöhte radiale Biegefestigkeitswerte Rechnung. Die Holzfestigkeiten liegen im nicht durch Fäule befallenen Bereich um die Faulhöhle deutlich höher als bei vergleichbaren gesunden Stämmen ohne Faulhöhle.

Durch holzanatomische Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß die Querschnittsgeometrie der radial verlaufenden Holzstrahlen in Stamm und Wurzelanlauf an deren jeweilige mechanische Belastungssituation angepaßt ist.

Investigation of Stress Control of the Radial Strength Distribution in Trees.

Abstract

It has been demonstrated by measurement of the radial flexural strengths of wood, performed with a Fractometer at quite a number of trees, that the lateral strength distribution is equal to the calculated lateral tensile stress distribution (under bending load).

Trees protect their wood bodies composed of longitudinal and radial fibers against delamination of the longitudinal fibers through stress controlled radial strength distribution adapted to the working load.

It appeared from theoretical studies that the annual increment in thickness growth of the trees is accompanied by a variation of the transverse tensile stress distribution and hence the distribution of strengths in the interior of trees. The local maxima of distribution migrate through the wood body at the rate of increment in radial tree growth.

Trees whose wood decays by rotting respond to this cross sectional weakening by an increase in radial flexural strength. The wood strengths in the zone not invaded by rotting around the rotting cavity are clearly higher than in comparable sound stems without rotting cavity.

It could be shown by investigations of the wood anatomy that the cross sectional geometry of the radial wood rays is adapted to the respective mechanical loading situation both in the stem and in the root collar.

Inhalt

1. Einleitung.....	1
2. Das Axiom konstanter Spannung.....	3
3. Bau und Leben der Bäume.....	5
3.1. Das Wachstum der Bäume.....	5
3.2. Holz, das Baumaterial der Bäume.....	6
3.2.1. Bestandteile und Aufbau des Holzes.....	7
3.2.1.1. Nadelholz.....	9
3.2.1.2. Laubholz.....	10
4. Schadensfälle aus der Natur.....	13
4.1. Der Unglücksbalken.....	13
4.2. Der Wurzelauftrieb.....	15
4.3. Der hohle Baum.....	18
5. Methoden.....	21
5.1. Verwendete Rechenmethoden.....	21
5.1.1. Das CAO-Verfahren.....	21
5.1.2. Das CAIO-Verfahren.....	22
5.2. Verwendete Meßmethoden.....	23
5.2.1. Das Fractometer I.....	24
5.2.2. Das Fractometer II.....	27
5.2.3. Der Resistograph.....	28
5.3. Vorgehensweise beim Messen.....	31
5.3.1. Bohrprobenentnahme.....	31
5.3.2. Messen mit dem Fractometer.....	32
5.3.3. Messen mit dem Resistographen.....	34
5.3.4. Vergleich von Fractometer und Resistograph.....	35
5.4. Darstellung der radialen Biegefestigkeitswerte.....	38
5.5. Spannungsberechnung der Baummodelle.....	39

6. Ergebnisse	45
6.1. Der gekrümmte Biegeträger	45
6.2. Vergleich der Festigkeiten mit den Querspannungen	47
6.3. Festigkeitsverteilung im Bohrkern.....	90
6.4. Das Maximum wandert.....	92
6.5. Die Strategie des hohlen Baumes.....	97
6.6. Holzanatomische Untersuchungen	100
7. Diskussion.....	105
7.1. Biegebalken.....	105
7.2. Festigkeits- und Spannungsverteilungen.....	105
7.3. Festigkeitsverteilung im Bohrkern.....	107
7.4. Wanderndes Maximum.....	108
7.5. Der hohle Baum	109
7.6. Holzanatomische Untersuchungen	110
8. Zusammenfassung und Ausblick	113
9. Literatur	117

1. Einleitung

Mit dem Entstehen des Lebens auf unserer Erde begann auch der Wettbewerb um Lebensraum und Nahrung der Kreaturen untereinander. Dieser Überlebenskampf sorgte durch natürliche Selektion dafür, daß unvollkommene Lebensformen von besser angepassten Individuen verdrängt wurden und wieder von der Erde verschwanden. Wer im ständigen Konkurrenzkampf gegen Mitbewerber fortbestehen will, muß an seine Lebensbedingungen optimal angepaßt sein. Dies erfordert einen ideal auf die spezifischen Belange zugeschnittenen äußeren aber auch inneren Aufbau der biologischen Struktur. Dabei ist eine ganz allgemeine Eigenschaft evolutiver Selektionsprozesse, daß sie schließlich zu sinnvollen Lösungen gegebener Probleme mit einem Höchstmaß an Effizienz in deren Realisation führen.

Noch vor Jahren wäre eine Arbeit mit dem vorliegenden Inhalt im Fachbereich Maschinenbau nur schwer denkbar gewesen. Die Trennung der einzelnen Disziplinen Biologie und Technik schien zu groß. Themen wie grünes Holz und Bäume waren eher etwas für Gärtner oder Förster. Mit der Einführung des Begriffs der Bionik¹ zeichnet sich jedoch eine Entwicklung ab, in der sich Wissenschaftler weltweit damit beschäftigen aus den Problemlösungen, die sich im Dschungel der Evolution durchsetzen konnten, für technische Konstruktionen zu lernen aber auch umgekehrt aus diesen heraus, ein besseres Verständnis für evolutive Entwicklungen zu gewinnen.

Durch den mittlerweile eigenständigen Forschungsschwerpunkt Bionik wurde man in vielen Fachbereichen auf das riesige Reservoir an *geprüften* Gestaltungsprinzipien der Natur aufmerksam. NACHTIGALL (1986) gibt einen Einblick in die Vielgestaltigkeit und den Ideenreichtum der Natur auf ihrer Suche nach konstruktiven Lösungen. Dies läßt erahnen, welches gestalterische Potential der Natur zur Verfügung steht, die jeweiligen an das Individuum gestellten Aufgaben zu erfüllen. Nicht zuletzt ist auch das CAO-Verfahren nach MATTHECK (1990a) zur Gestaltoptimierung von Bauteilen aus den Betrachtungen über Bäume und Knochen hervorgegangen.

Bäume können in erster Näherung als natürlich gewachsene Faserbündel abstrahiert werden. Ein Baum oder Ast ist letztendlich nichts anderes als ein einseitig eingespanntes Faserbündel, welches auf Biegung belastet wird - eine typische Ingenieursfragestellung also. Bäume haben unter ihren biologischen Restriktionen Lösungen zu finden, die auch mechanisch sinnvoll sind. Die mechanischen Probleme sind für Bäume, seien sie hohl, krumm oder kerzengerade, prinzipiell die gleichen wie sie auch in der Technik tagtäglich auftreten und gelöst werden müssen. Aus den Lösungen, wie Bäume mit ihren inneren Festigkeitsproblemen fertig werden und welche Vorsichtsmaßnahmen sie gegen frühzeitiges Versagen in diesen Bereichen entwickelt haben, können Ingenieure für das Design und den Aufbau künstlicher Faserwerkstoffe lernen. Wenn sich also ein Ingenieur auf das

¹ Bionik: Kurzwort aus **Biologie** und **Technik**. 1958 von STEELE eingeführter Begriff für einen technisch orientierten interdisziplinären Wissenschaftszweig, dessen Ziel es ist, gegebene Strukturen und Funktionen, wie sie in der Natur zu beobachten sind, im Hinblick auf techn. Verwertbarkeit zu untersuchen und als Anregung für Eigenständiges techn. Gestalten zu nehmen sowie zur Optimierung vorhandener oder zur Schaffung neuer techn. Geräte, Konstruktionen, Systeme u. a. nutzbar zu machen (BROCKHAUS 1987).

Gebiet der Biologie und Forstbotanik vorwagt, ist dies nicht ganz so *fachfremd* wie es die unterschiedlichen Wissenschaftszweige zunächst vermuten lassen.

Nachdem sich MATTHECK (1992a, 1992b) und MATTHECK & BRELOER (1993) hauptsächlich mit der äußeren Gestalt der Bäume befassen, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit im wesentlichen mit der Innenarchitektur und den inneren Aufbauprinzipien der Bäume. Hierbei stehen die Holzstrahlen nicht ohne Grund im Mittelpunkt des Interesses. Wie im Laufe der Arbeit gezeigt werden kann, haben sie einen entscheidenden Beitrag für den inneren Zusammenhalt des Baumes zu leisten. Des weiteren soll gezeigt werden, daß eine Betrachtung der Holzstrahlen unter dem alleinigen Gesichtspunkt der Speicher und Transportfunktion von Wasser und Nährstoffen nicht länger haltbar ist. Erste Hinweise für die mechanischen Aufgaben eines Holzstrahles gibt BRAUN (1992) mit seiner Beobachtung, daß Holzstrahlen, auch wenn sie ein Gefäß berühren, nicht zwangsläufig mit diesem in Verbindung stehen. MATTHECK & SCHWARZE (1994) zeigen, daß die Holzstrahlen einiger Baumarten einen Aufbau aufweisen, welcher zu einem mechanischen Verhalten führt, das dem eines I-Trägers sehr nahe kommt. Der Holzstrahl mancher Bäume ist also bestens auf das Ertragen von Biegebelastung ausgelegt.

Die vielfältigen Veränderungen, denen ein Baum im Laufe seines gesamten Lebens unterliegt, erfordern einen äußerst flexibel gestalteten Reaktionsmechanismus von diesem. Fäulnis, Änderungen in seinem Lebensraum, ja selbst das eigene Wachstum sind nur einige Veränderungen, auf die der Baum permanent in angepaßter Weise antworten muß. Es ist leicht vorstellbar, daß durch Veränderungen Baumbereiche plötzlich Belastungen ausgesetzt sind, für die sie ursprünglich nicht ausgelegt waren. Der Baum sollte in diesen Bereichen nachbessern und verändern können, wenn er sich weiterhin optimal gegen Versagen schützen will.

Diese Arbeit versucht zu erörtern, welche Möglichkeiten der innere Baumaufbau dabei bietet und welche Optimierungsstrategien die Bäume als Wesen, die nur auf ihrer Oberfläche zuwachsen, im Laufe von jahrmillionenlanger evolutiver Entwicklung finden konnten. Insbesondere soll die radiale Festigkeit der Bäume als Widerstand gegen axiale Spaltungen, also gegen Separation quer verbundener Holzfasern untersucht und ihre Verteilung im Zusammenhang mit der Verteilung der Querspannungen verglichen werden.

Mit neuen Holzdiagnosegeräten zur Festigkeits- und Bohrwiderstandsmessung (Fractometer und Resistograph-M) sollen Erkenntnisse über die innere Festigkeitsverteilung gewonnen werden und diese mit begleitenden Spannungsanalysen auf der Basis der Finiten-Elemente-Methode² (FEM) bewertet werden. Zusätzliche holzanatomische Untersuchungen zeigen im Anschluß daran, welche Möglichkeiten aber auch welche Grenzen dem Baum gegeben sind, seine innere Struktur den vorhandenen Aufgaben bestmöglichst anzupassen.

² Die Methode der Finiten Elemente ist ein weitverbreitetes Verfahren zur numerischen Lösung von Festigkeitsproblemen aller Art. Das Verfahren basiert auf der Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme höherer Ordnung durch Minimierung der Systemenergie. Hierzu wird die Struktur in endlich große Elemente unterteilt, die über Knoten miteinander verbunden sind (SCHWARZ 1984).

2. Das Axiom konstanter Spannung

Auf dem Forschungsgebiet der Bäume waren es zunächst der Forstassessor METZGER (1893) und später YLIEN (1952), die einen Zusammenhang zwischen der äußeren Gestalt des Baumes und seiner mechanischen Belastung herstellten. Insbesondere METZGER konnte in seiner Arbeit eine feste Relation zwischen Stammdurchmesser und Höhe bei Fichtenstämmen nachweisen. Die gleiche Höhe-Durchmesser-Relation ergibt sich bei einem auf Biegung belasteten, einseitig eingespannten Träger mit der Forderung nach Konstanz der Randfaserspannung.

Erst viel später wurde mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente von MATTHECK (1990b, 1991 und 1992a) und Mitarbeitern anhand einer großen Zahl von Beispielen nachgewiesen, daß auch andere Baumteile (Astanbindungen, Zwiesel, Wurzelanläufe etc.) nach dem gleichen Prinzip gestaltet sind. Ihre äußere Gestalt wird vom Baum so gewählt, daß bei typischer Belastung die auftretenden Spannungen an deren Oberfläche konstant, d. h. gleichmäßig verteilt sind. MATTHECK (1992) erweiterte dieses Designprinzip auf andere biologische Lastträger wie Krallen, Warzenschweinhauer und Knochen. Er formulierte daraus das **Axiom konstanter Spannung** für natürliche Lastträger. Diese nehmen hiernach eine Gestalt an, die bei bestimmungsgerechter Belastung weder lokal hohe Spannungen (Kerbspannungen) noch unterbelastete Bereiche (Materialverschwendung) auf ihrer Oberfläche besitzen. Existiert für ein Bauteil eine konstante Spannungsverteilung, so gibt es keinen Ort, an dem ein Versagen durch Materialüberbeanspruchung bevorzugt starten kann. Für jeden Ort liegt somit die gleiche Versagenswahrscheinlichkeit vor. Bäume erreichen diesen "gerechten" Zustand durch lastgesteuertes, adaptives Wachstum. Veränderungen in ihrer Umwelt, ja sogar das eigene Höhen- und Dickenwachstum zwingen sie zu lebenslanger Wachsamkeit und Anpassung an neu gegebene Belastungssituationen, immer im Dienste einer möglichst gleichförmigen Lastverteilung. Dasselbe gilt auch für mechanische Verletzungen, die der Baum, gleich welcher Art, während seines oft bewegten Lebens nicht selten erfährt. Solche Wunden heilen ebenfalls spannungsgesteuert dort am schnellsten, wo sich die höchsten Kerbspannungen befinden, um den ungleichen Spannungszustand möglichst schnell wieder zu egalisieren.

So positiv sich eine gerechte Spannungsverteilung auf die Materialausnutzung auch auswirkt, Spannungs Konstanz auf der Oberfläche ist noch lange kein Garant für ein sorgenfreies Leben. Gleichgültig nämlich, mit welcher Akribie der Baum seine äußere Gestalt optimiert, er kann Versagen, hervorgerufen durch innere Spannungen, dadurch nicht verhindern. Von diesen unter der Baumoberfläche versteckten Gefahren, insbesondere der axialen Spaltung, wird im weiteren noch eingehend die Rede sein.

3. Bau und Leben der Bäume

3.1. Das Wachstum der Bäume

Bäume begegnen dem Menschen in einer derartigen Vielfalt, daß es oft verwundert, daß sie alle den gleichen Steuermechanismen unterliegen. Dabei wird die Grunderscheinung des Baumes von mehreren Faktoren gleichzeitig bestimmt. Sie nehmen je nach Standort und Wachstumsbedingungen unterschiedlich stark Einfluß auf die Baumgestalt. MATTHECK (1992a) hat die vier wichtigsten Mechanismen thesenartig zusammengefaßt:

- **Geotropismus:** bestimmt das Wachstum der Hauptwurzel bzw. des Hauptsprosses in oder entgegen der Erdanziehungskraft. Der Baum erreicht hierdurch eine Minimierung der Hebelarme, indem er seinen Kronenschwerpunkt über dem Wurzelstock zu plazieren versucht.
- **Phototropismus:** ist der beherrschende Wachstumsfaktor. Unter diesem Begriff wird alles Orientierungswachstum zusammengefaßt, das einer möglichst großen Lichtaufnahme dient. Daß dies nicht selten im Widerspruch zu den Restriktionen des Geotropismus steht, ist direkt einleuchtend. Gerade der Kampf ums Licht führt oft zu abenteuerlich anmutenden Tragwerken mit enormen Hebelarmen. Aber ohne Licht kein Leben! Somit ist der Baum gerade hier etwas verschwenderischer, denn für lange Hebelarme muß er mit einem Mehraufwand an Material bezahlen.
- **Apikaldominanz:** zwingt die Seitentriebe, einen gewissen Abstand zum momentanen Wipfeltrieb einzuhalten. Dies wirkt dem Geotropismus entgegen.
- **Adaptives Wachstum:** sorgt für Spannungskonstanz auf der Baumoberfläche, indem alle Baumkomponenten und Wunden gestaltoptimiert wachsen. Dabei wird dort vermehrt Holz angelagert, wo die im Jahresmittel größten Betriebsbelastungen herrschen.

Es existieren noch wesentlich mehr Wachstumsfaktoren und Regulatoren, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll. Aufgrund dieser Steuermechanismen wächst der Baum gemäß seiner genotypischen Veranlagung ständig einer Gleichgewichtslage zu. Wird dieser erblich fixierte Gleichgewichtszustand gestört, kann er diesem durch Bildung von Reaktionsholz entgegenwirken. Hier findet sich das erste Unterscheidungsmerkmal von Laub- und Nadelhölzern. Während Nadelbäume Druckholz formieren, bilden Laubholzgewächse ausnahmslos Zugholz, um Richtungsänderungen zu erreichen. Das Reaktionsholz wird einseitig an Stamm oder Ästen gebildet. Das Druckholz der Nadelbäume wird auf der Unterseite von hängenden Stämmen oder Ästen formiert, das Zugholz der Laubbäume auf deren Oberseite (BOSSHARD 1984, MATTHECK 1992a).

Die nordamerikanischen Mammut-Bäume oder die Rieseneukalypten Tasmaniens zählen mit ihren mehr als 100 m hohen Stämmen zu den größten Lebewesen der Erde. Ihr Stamm trägt nicht nur die Krone, sondern auch der gesamte Stoffaustausch zwischen Krone und Wurzel muß durch ihn erfolgen. Die Doppelfunktion als Stütze und Transportbahn erfordert eine Verdickung des Stammes, die auf das Ausmaß der Blattfläche und des Wurzelsystems abgestimmt ist. Das Wachstum der Bäume wird dabei nach

STRASBURGER (1991) in zwei Abschnitte eingeteilt: dem primären Dicken- und Längenwachstum, was sich auf die ersten 0,04 - 25 mm der Sproßachsen³ und Wurzelenden beschränkt und dem sekundären Dickenwachstum, was den gesamten Rest betrifft. Alles Wachstum geht dabei vom Kambium aus. Es ist im voll entwickelten Zustand des Baumes ein einzelliger, geschlossener Hohlkegel, der Holz und Rinde trennt. Alle Zellen, die das Kambium nach innen abgibt, werden zu Holz. Sämtliche Zellen, die nach außen abgegeben werden, bilden die Rinde (BRAUN 1992). Durch das Übereinanderstülpen immer neuer Wachstumskegel (SHIGO 1990) entsteht ein Aufbau, der vom Aussehen her dem bekannten Gesellschaftsspiel "Fang den Hut" gleicht (Abb. 1). Das Kambium entscheidet dabei lokal und ohne mit anderen Baumteilen zu kommunizieren, wieviele Zellen gebildet werden, und welche Aufgaben diese später zu erfüllen haben.

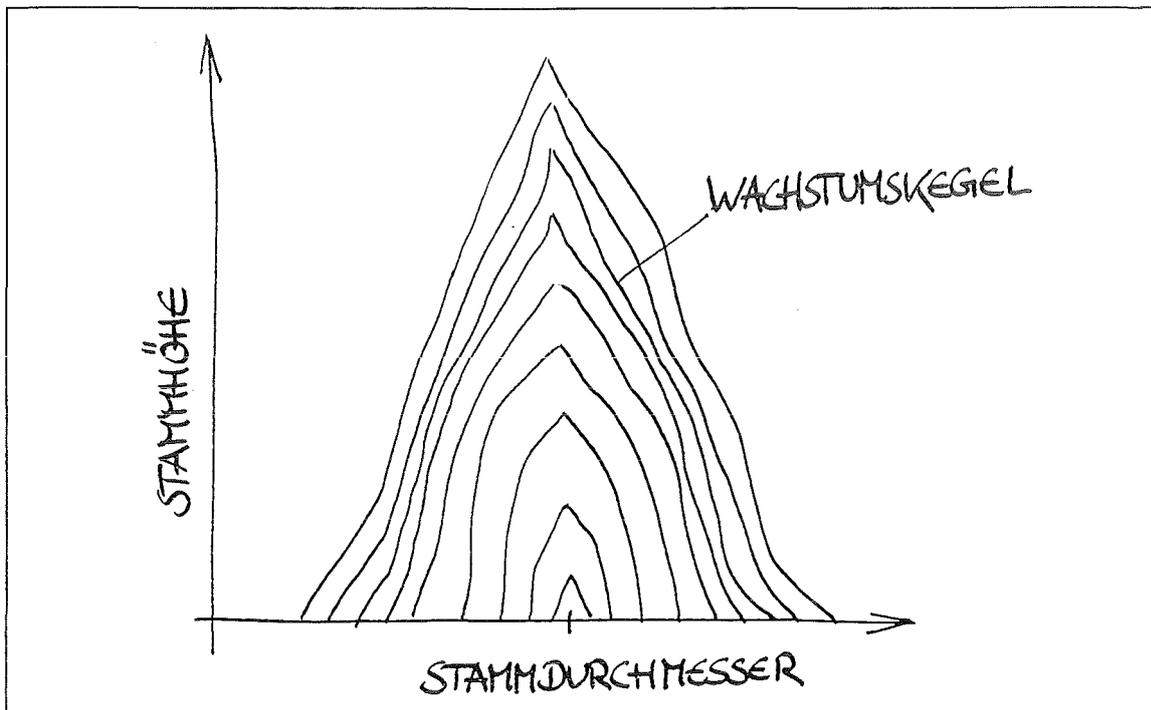


Abbildung 1: Schematische Darstellung der übereinandergestülpten Wachstumskegel. Jeder Kegel entspricht im Querschnitt einem Jahresring.

3.2. Holz, das Baumaterial der Bäume

Pflanzen, die anders als die meisten Tiere ortsgebunden sind, müssen sich vor allem gegen mechanische Zerstörung schützen. Sie haben auch evolutionsgeschichtlich gesehen, grundlegend andere Aufgaben zu erfüllen. Zu den Kampfplätzen der pflanzlichen Evolution gehören vor allem der Wald und der Dschungel. In ihrem stummen und erbarmungslos geführten Kampf um die Erhaltung der Art hatten oft diejenigen Pflanzen erhebliche Vorteile (im Sinne erhöhter Lichtaufnahme), die am höchsten wachsen konnten. Die

³ Als Sproßachse bezeichnet man diejenigen oberirdischen Baumteile, die dem Assimilat- und Wassertransport sowie der Nährstoffspeicherung dienen.

langsam wachsenden, dafür aber extrem langlebigen Bäume waren dabei die Sieger, indem sie Pflanzen geringerer Bauhöhe überschatteten.

3.2.1. Bestandteile und Aufbau des Holzes

Über Holz und Holzwerkstoffe ist mittlerweile sehr viel bekannt und veröffentlicht. Im folgenden sollen deshalb auch nur diejenigen grundlegenden Dinge angesprochen werden, die zum besseren Verständnis der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen und der Ergebnisse notwendig sind.

Die Festigkeit, wie sie von kleinen, krautigen Pflanzen über das Zusammenspiel von Turgor und Wanddruck (Luftballon-Prinzip) bekannt ist, genügt nicht bei größeren, über mehrere Vegetationsperioden existierenden Gewächsen. Die hohen Zug- und Druckbelastungen (z. B. bei Sturm) von Wurzeln und Stamm erfordern ein spezielles Festigungsgewebe. Zu den wichtigsten Bestandteilen dieser Gewebe gehört die Cellulose⁴, die als Gerüstmaterial in den Wandschichten der Pflanzenzelle abgelagert wird. Die Cellulosemoleküle legen sich zu Fibrillen zusammen. Diese verkleben miteinander und winden sich schraubenartig um die Längsachsen der Zellen. JERONIMIDIS & GORDON (1974) konnten zeigen, daß diese schraubenförmige Fibrillenordnung zu einer Spannungsdehnungskurve ähnlich der von duktilen Metallen führt.

Neben Cellulose sind Lignine⁵ ein weiterer Hauptinhaltsstoff der Holzzellen. Durch Inkrustation⁶ mit Lignin können die Zellwände zusätzlich starr und druckfest werden. Lignin wirkt somit als druckfester Stützstoff der verholzten Pflanzenteile. Die Lignine sorgen also für die Druckfestigkeit, während die Celluloseketten vor allem zur Zugfestigkeit beitragen. Hierbei ist interessant anzumerken, daß Cellulose, bei einer Dichte von nur 1,5 g/cm³, einen ähnlich hohen E-Modul wie die Metalle besitzt, wenn man diesen auf das Gewicht bezieht (GORDON 1989). STRASBURGER (1991) und TROLL (1959) prägen für den Aufbau der Zellwand Stahlbeton als treffendes Analogon. Hierbei entsprechen die zähen, reißfesten Cellulosefibrillen dem Stahl und die sie umgebende druckfeste, aber eher spröde Ligninmatrix dem Beton.

Holz ist mitnichten ein homogenes Material. Das bringt schon die dreigeteilte Funktion, die es im Baum zu erfüllen, hat mit sich. Der Holzkörper ist gleichermaßen für Festigung, den Transport von Wasser und Nährsalzen, sowie die Speicherung von organischen Stoffen verantwortlich.

Die kleinsten Bausteine des Holzes sind die Zellen, die sich gemäß ihrer Funktion nach STRASBURGER (1991) in 4 wesentliche Gruppen gliedern lassen:

- **Tracheiden:** tote Röhrenzellen mit stark verdickten, lignifizierten Wänden. Sie werden sowohl dem Festigungs- als auch dem Hydrosystem zugeordnet.

⁴ Cellulose ist ein Kettenmolekül, zusammengesetzt aus einzelnen Glucoseeinheiten (GORDON 1989).

⁵ Lignin ist eine strukturell nicht streng definierte Verbindung und entsteht durch Polymerisation aus Phenolkörpern; bildet ein dreidimensional wachsendes hochmolekulares Netzwerk.

⁶ Inkrustation: Druckfeste Zellwände ergeben sich durch Einpacken (Inkrustieren) der Gerüstfibrillen in formfeste Materialien. Inkrustation mit Lignin bedeutet Verholzung der Zellwand.

- **Tracheenglieder:** tote weitlumige, mäßig verdickte Röhrenzellen, die durch die aufgelösten Querwände mit anderen Tracheengliedern in Verbindung stehen und das sog. Gefäßsystem bilden, welches ausschließlich dem Wassertransport dient.
- **Holzfasern:** Röhrenzellen mit extrem dicken und stark lignifizierten Wänden. Sind die Zellen tot, so gehören sie ausnahmslos dem Festigungssystem an, andernfalls auch dem Speichersystem.
- **Holzparenchymzellen:** lebende Zellen, die der Speicherung und dem Transport organischer Nährstoffe dienen.

Damit ein Austausch von Nährstoffen oder Wasser zwischen den Zellen vollzogen werden kann, besitzen Tracheiden, Tracheen und Holzparenchymzellen Tüpfel. Als Tüpfel wird ein Durchbruch von einer Zelle zu ihrer Nachbarzelle mit Ventilfunktion bezeichnet. Holzfasern besitzen keine oder nur sehr kleine Tüpfel.

Bäume aus Klimazonen, die einem jahreszeitlichen Wechsel unterliegen, quittieren dies mit der Bildung von Jahresringen⁷, die je nach Spezies mehr oder weniger sichtbar werden, blickt man in axialer Richtung auf einen senkrecht dazu liegenden Sägeschnitt eines Stammes oder Astes. Die Ausdifferenzierung der vom Kambium abgegebenen Zellen erfolgt sehr schnell. Diese können sich danach in ihrer Struktur nicht mehr verändern (BRAUN 1992). Hierbei wird bestimmt, welche Aufgabe die Zelle in Zukunft zu erfüllen hat, ob sie eine Siebzelle, ein Gefäß, eine Holzfaser oder ein Harzkanal wird. Es wird nicht nur entschieden, ob und wieviele Kontakte (Tüpfel) die neue Zelle mit ihren Nachbarn haben wird, sondern auch der Cellulosefibrillenwinkel wird festgelegt.

Das Kambium liefert auch Zellen, die radial gerichtet sind: die Holzstrahlen. Diese ragen strahlenartig in das Holz hinein und verbinden Mark und Bast. Die Zellen der Strahlen sind in radialer Richtung gestreckt und fügen sich zu langen Zellreihen zusammen.

Im Laufe des sekundären Dickenwachstum muß sich der Kambiumzylinder ständig erweitern und vergrößern. Die Holzstrahlen rücken somit zwangsläufig auf dem Umfang immer weiter auseinander (siehe Abb. 2). Wird dabei ein artspezifischer Abstand überschritten, werden neue Holzstrahlen gebildet, die dann blind im Holz beginnen. Holzstrahlen sind über Tüpfel mit dem axialen Gewebe untereinander zu einem System verbunden. Nach ECKSTEIN (1994) sind die Holzstrahlzellen am längsten von allen Zellen im Splintholz am Leben.

MATTHECK *et al.* (1994a) zeigen in weitgehend selbsterklärenden Zeichnungen die Zweckmäßigkeit des *mandelförmigen* Holzstrahlquerschnitts und des senkrechten Ausrichtens der Holzstrahlen auf die Jahrringgrenze. Im ersten Fall (A) werden die Längsfasern sanft um den Holzstrahl herumgelenkt, im zweiten Fall (B) werden durch das rechtwinkelige Auftreffen tangentielle Spannungen vermieden, die das Risiko einer Radialsplattung erhöhen würden (Abb. 3).

⁷ Jahresring: Schnittbilder der in den einzelnen Wachstumsfolgen entstandenen Holzmäntel. Der Ringbau wird dann besonders deutlich, wenn innerhalb jeder Zuwachszone lockere und dichte Holzgewebe aufeinanderfolgen.

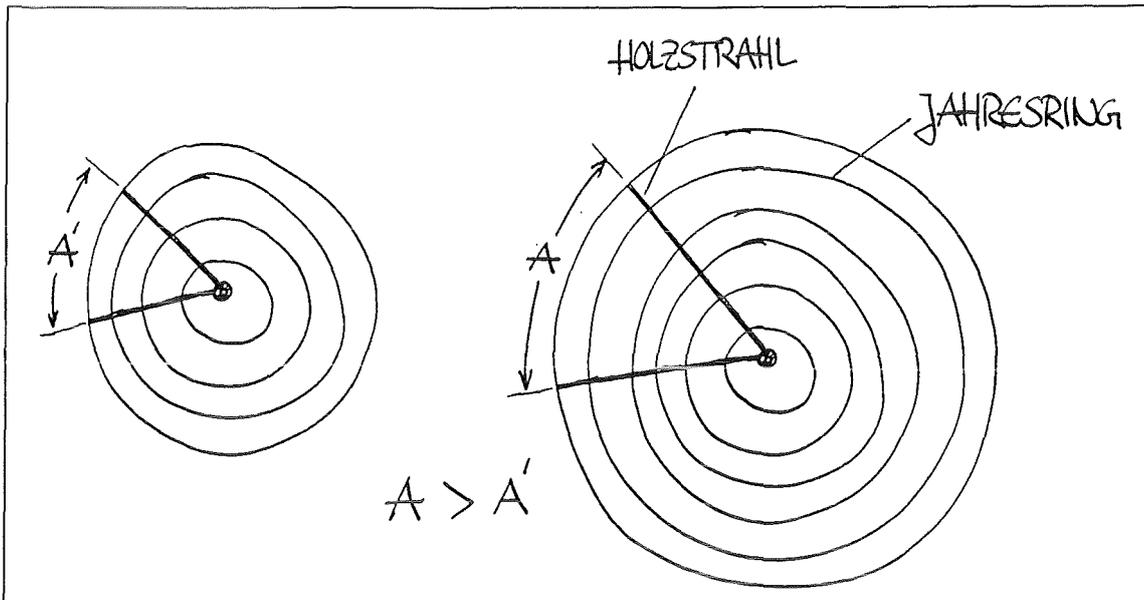


Abbildung 2: Durch das sekundäre Dickenwachstum wird der horizontale Abstand der Holzstrahlen zueinander auf dem Umfang mit jedem Jahr größer.

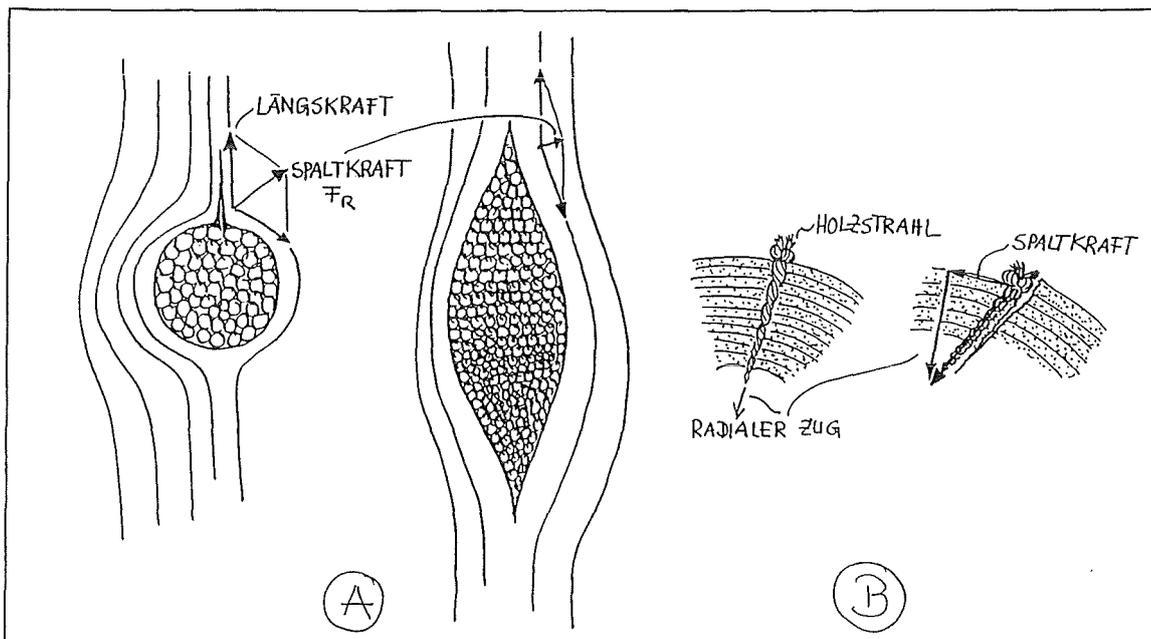


Abbildung 3: Reduzierung der resultierenden Querkraften F_R durch sanftes Umlenken der Längsfasern um die Holzstrahlen (A). Vermeidung einer Spaltkraft durch senkrechten Verlauf der Holzstrahlen zu den Jahresringen (B) nach MATTHECK *et al.* (1994a).

3.2.1.1. Nadelholz

Die Holzgrundmasse der Nadelbäume (Gymnospermen) besteht im wesentlichen aus Tracheidengewebe. Dabei sind die zu Beginn der Wachstumsperiode gebildeten Zellen dünnwandig und weitlumig, um den Wasserbedarf der jungen Triebe zu befriedigen. Dieses Holz wird als Frühholz bezeichnet. Die Tracheiden, die gegen Ende der Wachstumsperiode erzeugt werden, sind zunehmend dickwandiger und englumiger. Dieses Holz

wird als Spätholz bezeichnet und dient hauptsächlich der Festigung. Im Gymnospermenholz werden also zwei Funktionen von einer Zelle getragen, was von einem geringen Spezialisierungsgrad zeugt. Die Tracheiden sind über Tüpfel miteinander verbunden um die Wasserleitung von unten nach oben aber auch radial zu erleichtern, was einer gleichmäßigen Wasserversorgung des Stammes dient.

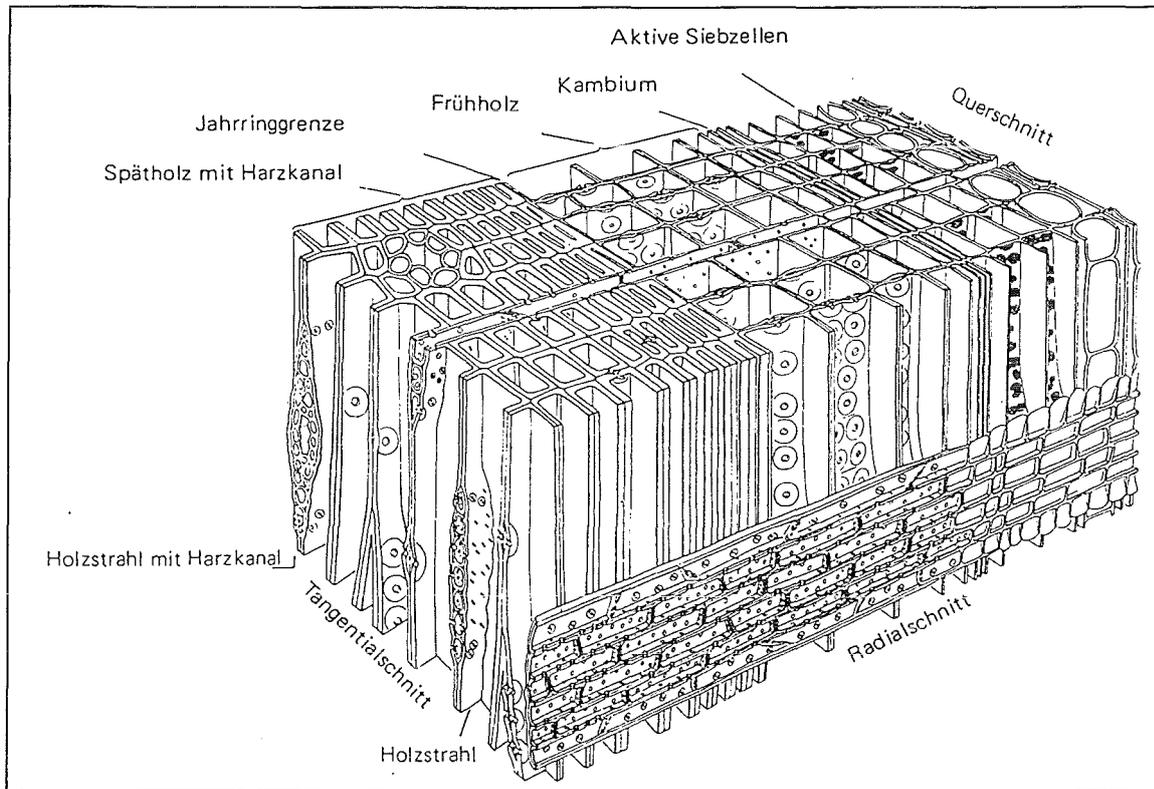


Abbildung 4: Dreidimensionale Anordnung der Zellelemente von Nadelholz (nach SCHWEINGRUBER 1990 von MÄGDEFRAU 1951).

Die radial verlaufenden Holzstrahlen sind im Nadelholz viele Zellen hoch aber nur eine einzige Zellschicht dick. Sie werden von lebenden Parenchymzellen begleitet. Befindet sich im Holzstrahl zusätzlich ein radialer Harzkanal, so ist dieser von Holzstrahlzellen umgeben. Der Holzstrahl ist in diesem Bereich also mehrreihig. Radial und axial verlaufende Harzkanäle sind untereinander verbunden und bilden ein dreidimensionales Netzwerk, das den gesamten Stamm durchzieht. Abbildung 4 verdeutlicht anhand eines kleinen Ausschnittes den strukturellen Aufbau von Nadelholz.

3.2.1.2. Laubholz

Das Holz der stammesgeschichtlich wesentlich jüngeren Laubbäume (Dicodyledonen) ist komplizierter aufgebaut als das der Nadelbäume. Es unterscheidet sich unter anderem durch das Vorhandensein von Tracheengliedern und einem speziellen Festigungsgewebe. Die Tracheenglieder sind zu einem weitverzweigten Wasserleitsystem zusammengeschlossen. Die Funktionenteilung, also Spezialisierung der einzelnen Systeme zwischen reiner Festigung und reiner Transportfunktion ist ein wesentliches Merkmal der Dicodyledonen. Harzkanäle fehlen im Holz der Laubbäume völlig. Bei den Laubbäumen, die

in Gegenden mit ausgeprägtem Jahreszeitenwechsel wachsen, kommt es ebenfalls zu der bereits erwähnten Früh- und Spätholzbildung. Im Gegensatz zu den Nadelhölzern kommen hier Parenchymzellen auch in axialer Richtung vor und begleiten nicht nur die radial gerichteten Holzstrahlzellen.

Die Holzstrahlen der Laubbäume sind überwiegend umfangreicher, d. h. höher und breiter als die der Gymnospermen und aus mehr Zellen aufgebaut. Abbildung 5 verdeutlicht anhand eines kleinen Ausschnitts den strukturellen Aufbau von Laubholz.

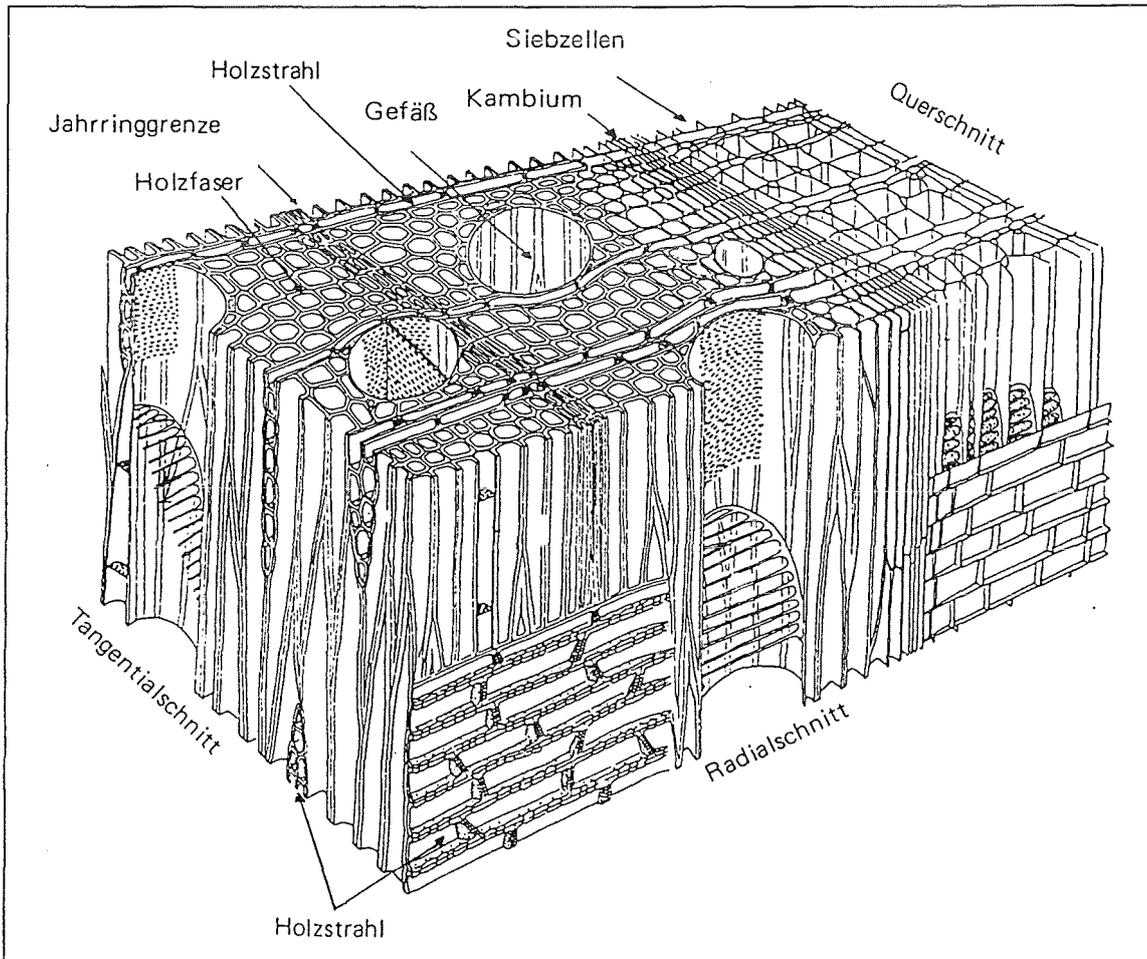


Abbildung 5: Dreidimensionale Anordnung der Zellelemente von Laubholz (nach SCHWEINGRUBER 1990 von MÄGDEFRAU 1951).

4. Schadensfälle aus der Natur

Wer nach einem kräftigen Sturm aufmerksam durch Wald und Parkanlagen wandert, wird bald zahlreiche abgerissene Äste oder vollständig zerstörte Bäume finden. Man wird danach die berechtigte Frage stellen, wie ein so hoch gelobtes und als optimale Gestalt gepriesenes Bauteil so jämmerlich versagen kann; haben adaptives Wachstum und Selbstoptimierung nichts genutzt?

Das Baumdesign ist immer ein Kompromiß zwischen Sicherheit gegenüber mechanischem Versagen und absolutem Leichtbau. Das begrenzte Nährstoff- und Wasserangebot, auf das Mitkonkurrenten ebenfalls zugreifen, zwingt den Baum zu einem optimierten Rohstoff- und Energiehaushalt. Dieser muß es ihm ermöglichen, eine möglichst große Krone zur maximalen Lichtaufnahme bei gleichzeitig minimalem Materialeinsatz aber hoher Widerstandsfähigkeit gegenüber Windbelastungen bilden zu können.

Das Designkonzept "*So leicht wie möglich, aber so fest wie nötig*" scheint immer dann erfolgreich zu sein, wenn dadurch die Erhaltung der Art gesichert wird. Die Natur nimmt eine gewisse Schadensrate auch völlig gesunder Individuen bewußt in Kauf, damit keine Wettbewerbsnachteile gegenüber dem risikobereiteren Nachbarn entstehen. Sie vermeidet Materialverschwendung zum Erreichen hoher Sicherheitsfaktoren sowie Sicherheit gegenüber Spitzenbelastungen, denen der Baum in seinem Leben eventuell niemals ausgesetzt sein wird. MATTHECK & BRELOER (1993) formulieren: "*Der Baumbruch ist der natürliche Preis, den die Art für die Realisierung energiesparenden Leichtbaus bezahlen muß.*"

Die vielfältigen Spielarten des Versagens der Bäume sind von MATTHECK (1992b) und MATTHECK & BRELOER (1993) reich illustriert und mit viel Liebe zum Detail allgemeinverständlich erklärt. Drei davon (Unglücksbalken, Wurzelanlauf, hohler Baum) sollen im folgenden nochmals aufgegriffen und einer rein qualitativen Betrachtungsweise unterzogen werden. Diese drei Schadensmechanismen bilden die Grundlage für die in Kapitel 5.4 gemachten Berechnungen und die in Kapitel 6.2 ff durchgeführten Messungen und Untersuchungen.

4.1. Der Unglücksbalken

Der lautmalerische Begriff: *Unglücksbalken*, wurde von MATTHECK (1992a) geprägt. Der Schadensablauf des Unglücksbalkens gilt als weitgehend verstanden und wurde von MATTHECK (1992b) und MATTHECK & BRELOER (1993) rein qualitativ und von MATTHECK & BURKHARDT (1991) auch quantitativ beschrieben.

Als Unglücksbalken können alle Stamm-, Ast- oder Wurzelgeometrien, kurz - sämtliche Faserbündel wirken, die eine Krümmung aufweisen und bei denen diese Krümmung durch Aufbiegen oder Zug verringert wird. In Abbildung 6 sind die drei bei Bäumen am häufigsten vorkommenden *Unglücksbalken* zusammenfassend skizziert.

- *Teilbild A*: der gekrümmte Stamm entstand durch die Übernahme der Wipfeltriebfunktion eines Seitenastes nach Absterben des früheren Hauptsprosses. Je nach

Baumart verschieden (Nadel- oder Laubbaum) wird der Seitenast durch Druck- bzw. Zugholzformation in die entsprechende Position gebogen.

- *Teilbild B*: ein Seitenast, der, sei es aus phototropen Gründen oder durch zu schwache Apikaldominanzbekundungen des Wipfeltriebes, aus seiner ursprünglich horizontalen in eine eher vertikale Wuchsrichtung einschwenkt.
- *Teilbild C*: der Wurzelstock dieses Baumes ist durch einen Erdbeben oder ähnliches gekippt. Der Stamm versucht nun, dem Geotropismus gehorchend, sich wieder aufzurichten und den Kronenschwerpunkt erneut über das Wurzelzentrum zu bringen.

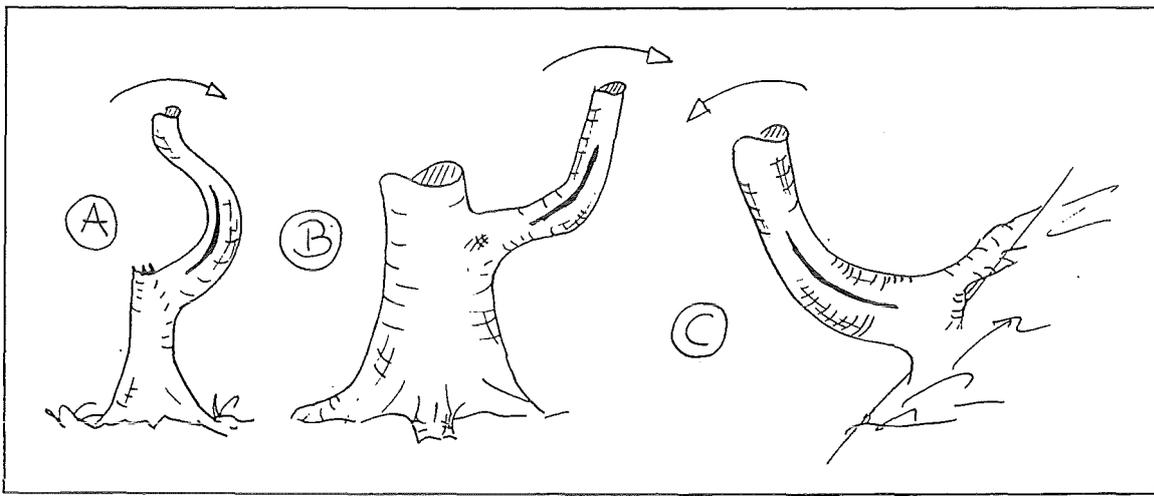


Abbildung 6: Skizze der drei am häufigsten vorkommenden Unglücksbalkensituationen

Werden diese Strukturen in der dargestellten Weise belastet, sind Querspannungen im Innern der Sproßachse die Folge. Abbildung 7 zeigt weitgehend selbsterklärend das Wirkprinzip des Unglücksbalken.

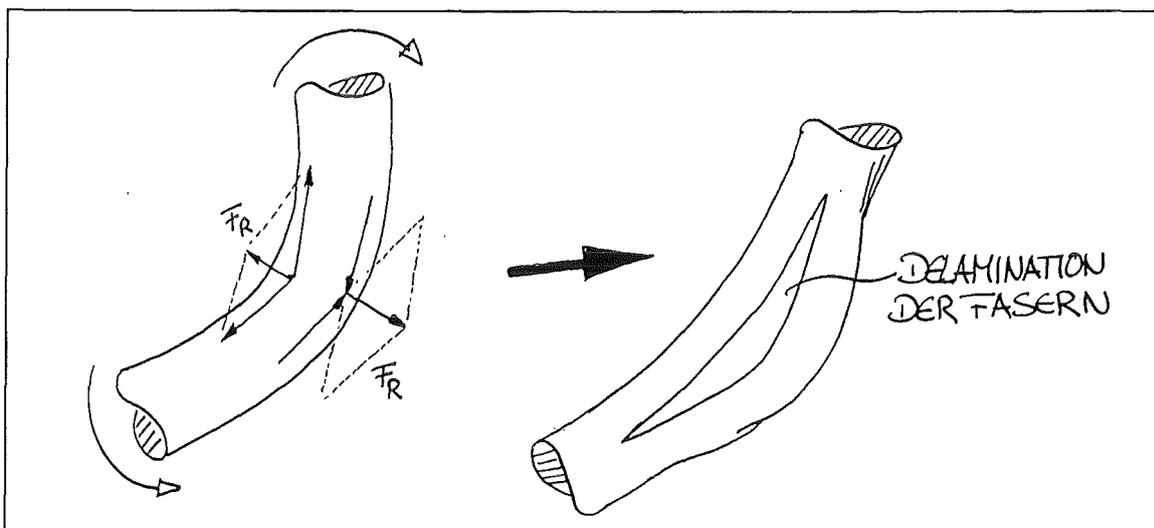


Abbildung 7: Wirkprinzip des Unglücksbalken. Wird das gekrümmte Faserbündel entgegen seiner Krümmung aufgebogen, kommt es zu Querspannungen (F_R), die zur Delamination der Längsfasern führen können.

Wird ein gekrümmter Balken aufgebogen, d. h. der Krümmungsradius wird vergrößert, kommt es zu Querkzugspannungen. Diese sind geometriebedingt an der Oberfläche Null und haben im Innern der Struktur ihr Maximum. Dabei kann die Längsspannung entlang der Oberfläche durchaus gleichmäßig sein und somit dem Axiom der konstanten Spannung genügen. Das Risiko der axialen Delamination aufgrund von Querkraften bleibt davon unberührt. Die innere Materialbelastung ist unmittelbare Folge der Krümmungsgeometrie und nur abhängig vom Umstand der Kraftflußumlenkung. Die Querkzugspannungen resultieren aus Querkraften, die senkrecht auf den Längsfasern stehen und radial nach außen zeigen. Wird dabei der für den Baum in dieser Richtung typische Festigkeitswert überschritten, so versagt das Baumteil durch Delamination. Die Photos in Abbildung 8 zeigen drei als *Unglücksbalken* versagte Baumstrukturen.

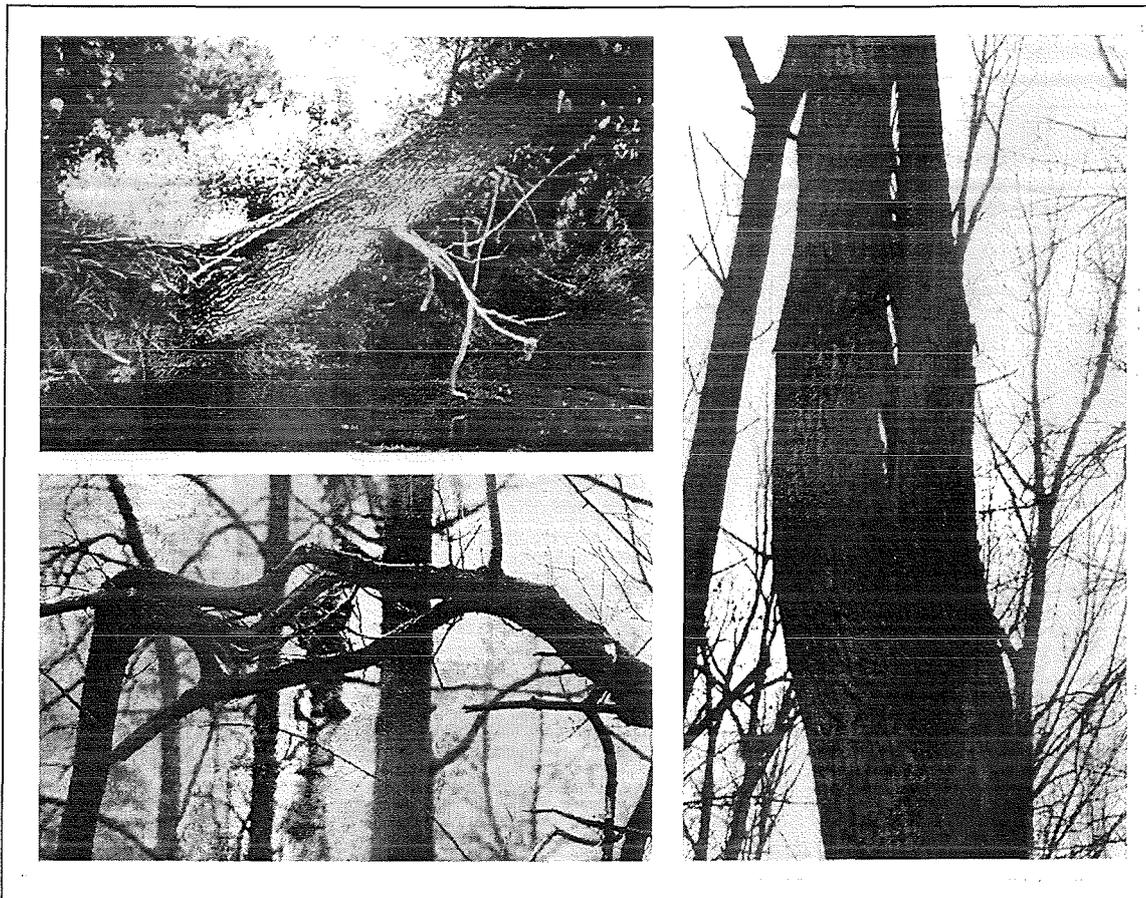


Abbildung 8: Die Ursache für das Versagen dieser Baumteile lag in allen drei Fällen in einer Kraftflußumlenkung, welche zu Querkzugkräften führte, die den Holzfaserverbund delaminieren ließen.

4.2. Der Wurzelanlauf

Der Begriff *Wurzelanlauf* steht für den Bereich des Baumes, in dem der vertikale Stamm in den Wurzelstock und seine mehr oder weniger horizontal verlaufenden Wurzeln übergeht. Die äußere Geometrie gehorcht auch hier den Gesetzmäßigkeiten des Axioms der konstanten Spannung.

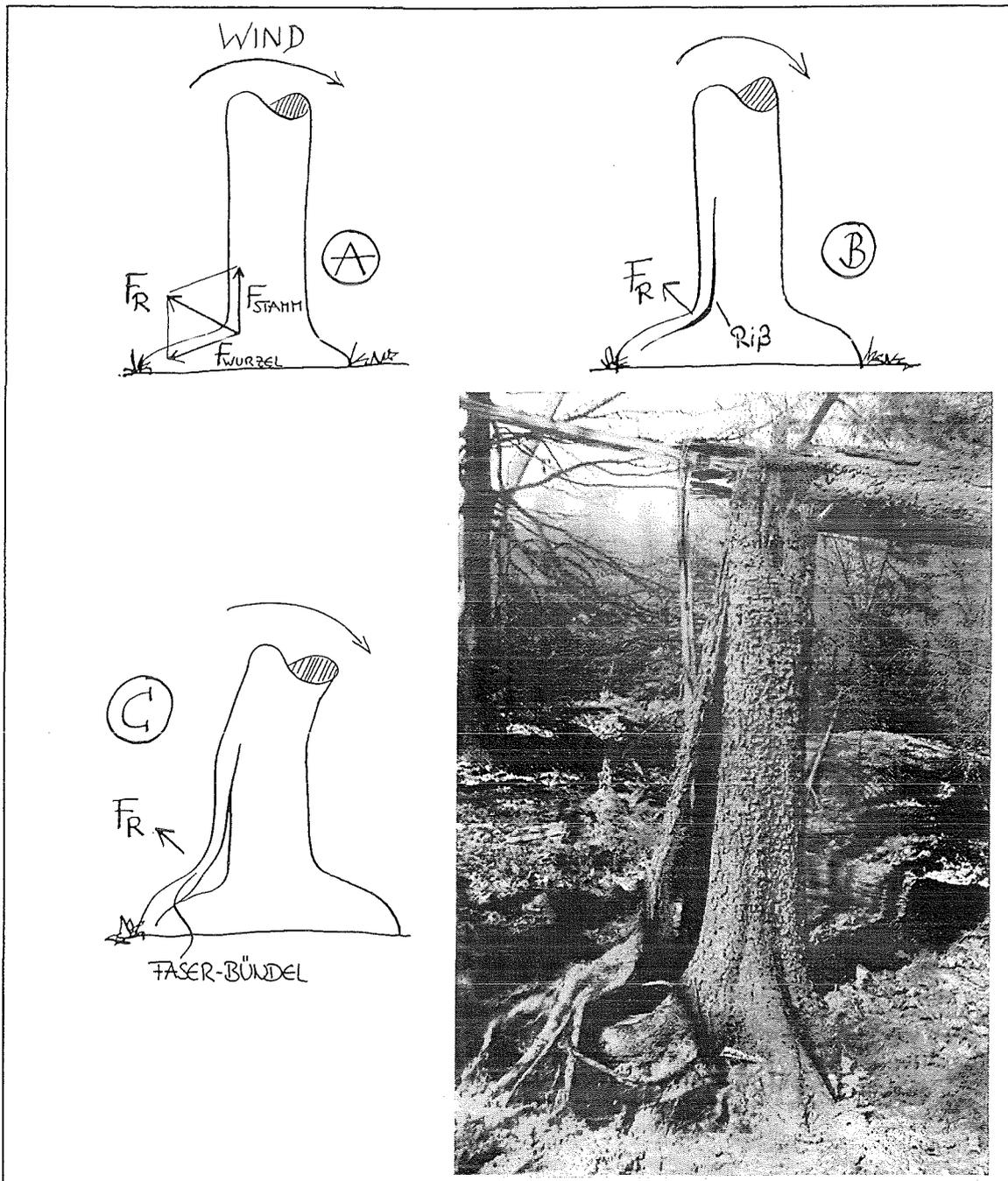


Abbildung 9: Wirkprinzip des *getarnten* Unglücksbalkens im Wuzelanlauf (A und B). Durch die Kraftflußumlenkung der vertikalen Stammkräfte (F_{Stamm}) in die horizontalen Hauptwurzeln kommt es zu einer resultierenden Spaltkraft (F_R). Das totale Stammversagen dieser Fichte wurde durch Faserdelamination im Wuzelanlauf initiiert (Photo und C). (Photo und Skizzen C. Matheck)

Der Wuzelanlauf, insbesondere der von Flachwurzeln⁸, erfüllt mit den von den Horizontalwurzeln einlaufenden und nach oben in den Stamm umgelenkten Holzfasern alle Kriterien für einen Unglücksbalken. Der Wuzelanlauf stellt somit einen gut getarnten

⁸ Flach- oder Senkerwurzelsysteme bestehen nach KÖSTLER (1968) aus dominierenden Hauptseitenwurzeln, die flach im Oberboden verlaufen. Von diesen zweigen mit zunehmendem Alter Wurzeln nach unten ab. Schräg verlaufende Wurzeln treten selten auf.

Sonderfall der oben bereits besprochenen Unglücksbalkensituation dar. Die wesentlichen und schadensauslösenden mechanischen Gegebenheiten sind identisch.

Die axialen Zugspannungen werden auf der dem Wind zugewandten Seite vom Stamm in den Wurzelbereich umgelenkt. Eine daraus resultierende Querkraft F_R (siehe Abb. 9 A und B), welche zu radial gerichteten Zugspannungen in diesem Bereich führt, ist die zwingende Folge. Bei Überschreiten der Materialfestigkeiten in dieser Richtung zerreißen zunächst die Mittellamellen⁹ und später die radial gerichteten Holzstrahlen. Damit sind die Längsfasern separiert. Dies führt dann nicht selten zu dem, insbesondere bei Fichten und Pappeln, beobachtbaren Stammbruch in ca. 2 m Höhe (vom Wurzelanlauf ab gemessen). Beim ersten schnellen Blick auf dieses globale Stammversagen (Photo in Abb. 9) vermutet man zunächst nicht den Wurzelanlauf als den eigentlichen Schadensauslöser. Dieser Schadensablauf wurde von GERHARD (1993) ausführlich rechnerisch beschrieben und diskutiert. Zwei Gesetzmäßigkeiten lassen sich hierbei erkennen:

- Je weiter weg vom Stamm die axialen Zugkräfte durch die Sinkerwurzeln der Horizontalwurzeln in das Erdreich geleitet werden, desto größer wird auch F_R .
- Je sanfter (möglichst großer Radius) der Kraftfluß vom Stamm in den Wurzelstock umgeleitet wird, desto kleiner wird F_R .

Konstruktive Maßnahmen, wie die oft von Fichten, Schwarzpappeln aber auch Buchen gebildeten Brettwurzeln, können die Kraftflußumlenkung nur mildern aber nicht völlig verhindern (MATTHECK & PRINZ 1991, MATTHECK 1992a).

4.3. Der hohle Baum

Nach dem bisher Dargestellten könnte der Eindruck entstehen, die einzigen Sorgen eines Baumes beschränken sich darauf, den mechanischen Belastungen durch Wind, Schnee, Eigengewicht etc. zu widerstehen. Es gibt aber eine ganze Reihe von Pilzen, die, angelockt von dem ungeheuren Nahrungsspeicher, sich am Baum zu schaffen machen.

Eine große Gruppe von Pilzen hat sich auf die Zersetzung von Holz spezialisiert. Sie dringen, begünstigt durch schwierige Lebensbedingungen, wie feuchte Standorte oder unsachgemäß durchgeführte forstliche Maßnahmen etc., vorwiegend über den Wurzelstock oder Wunden in den Baum ein. Die Holzzersetzung erfolgt dann vorzugsweise in axialer aber auch in radialer und tangentialer Richtung. Angaben über Abbaumechanismen und Unterscheidungsmerkmale der holzzersetzenden Pilze und Fäulen werden ausführlich in KOLLMANN (1951), WAGENFÜHR & SCHEIBER (1989), SHIGO (1990) und insbesondere mit Berücksichtigung mechanischer Effekte von SCHWARZE (1994) gemacht.

Die Folge von axial fortschreitender, fäulebedingter Holzzersetzung über mehrere Jahre hinweg ist nicht selten ein stark ausgehöhlter Baumstamm. Solch hohle Holzquerschnitte zeigen ein anderes Versagensverhalten als es von Vollquerschnitten bekannt ist.

⁹ Die Mittellamelle ist eine cellulosefreie Verbindungsschicht zwischen den Primärwänden der einzelnen Zellen.

Ein gesunder Baumstamm versagt unter Biegebelastung zunächst auf der Druckseite¹⁰ der Biegung durch Faserknicken, danach durch Faserzerreißen auf der Zugseite (MATTHECK 1992b). Kann einem Vollzylinder noch unterstellt werden, daß er bei Biegebelastung seine kreisrunde Querschnittsform weitgehend beibehält, so gilt dies für hohle Baumstämme nicht mehr uneingeschränkt. Mit zunehmender Krümmung entstehen einwärts gerichtete Radialkräfte, die eine Querschnittsverflachung verursachen. Bei weiterem Biegen spaltet der Stamm längs auf, sobald dessen Festigkeitswerte in tangentialer Richtung überschritten werden und zerbricht in vier oder mehr Segmente. Eine analytische Betrachtung zur Querschnittsverflachung und Längsspaltung hohler Bäume wird von GERHARD (1993) angegeben.

Bei sehr weit fortgeschrittener Aushöhlung, also sehr dünnen Wandstärken, versagt der Baum wie ein dünnwandiges Rohr durch Schalenbeulen. Hierbei knicken die auf der Druckseite der Biegung unter hoher axialer Kompression stehenden Holzfasern spontan aus. Das erhöhte Sicherheitsrisiko, das von ausgeprägt hohlen Bäumen ausgeht, und der Schadensablauf wird von MATTHECK & BRELOER (1991) und MATTHECK & BRELOER (1993) erklärt. Als Bewertungskriterium für solche Bäume wird das Verhältnis von Wandstärke (t) zu Stammradius (R) angegeben.

Ein Stamm, der im Innern stark ausgehöhlt ist oder dort nur minder tragfähiges Material besitzt, hat ein geringeres axiales Widerstandsmoment gegen Biegung als ein über den gesamten Querschnitt gesunder Stamm gleichen Durchmessers. Diesem Widerstandsverlust begegnet der vitale Baum in der Regel durch adaptives Wachstum auf seiner Oberfläche, indem er lokal den Außendurchmesser vergrößert - und zwar so lange bis wieder Spannungskonstanz entlang der Stammoberseite herrscht.

Der Außenradius (R_a) geht in die Formel für das Widerstandsmoment¹¹

$$W = f \left(R_a^3 - \frac{R_i^4}{R_a} \right)$$

in der dritten Potenz ein, was nur geringen Materialzuwachs auf der Oberfläche erfordert, um das Widerstandsmoment nachhaltig zu erhöhen.

Nach MATTHECK & BRELOER (1993) und MATTHECK *et al.* (1994b) versagen Bäume ab einem Wandstärke/ Radius-Verhältnis von ca. 0,3 durch das sog. *Schlauchknicken*, also durch Querschnittsverflachung. Windgeschützte Standorte, devitalisierte Bäume, geringe Holzzuwächse und radial sich rasch ausbreitende Fäule lassen schnell dünnwandige und somit auch beulgefährdete Stammquerschnitte entstehen. Betrachtet man die Formeln für Schalenbeulen, so haben diese im allgemeinen die Form:

$$\sigma_B \geq \sigma_{krit} = f \left(E, \frac{t}{R} \right)$$

¹⁰ Die Längsdruckfestigkeit von Holz beträgt nur ca. 50% der Längszugfestigkeit.

¹¹ allgemeine Form der Formel des Widerstandsmoments für Rohrquerschnitte (BEITZ & KÜTTNER 1987)

Beulen tritt immer dann auf, wenn in der Oberfläche Spannungen erzeugt werden, die größer sind als eine kritische Spannung σ_{krit} (GORDON 1978). Man erkennt sofort die zwei prinzipiellen Möglichkeiten, die ein Baum hat, sich gegen diesen Schadensfall zu schützen. Zum einen kann er, wie schon oben erwähnt, für eine große Wandstärke (t) sorgen, zum anderen kann er zusätzlich in diesem Bereich seinen Elastizitätsmodul (E), also die Materialsteifigkeit erhöhen.

MATTHECK (1992b) konnte an zahlreichen Konstruktionen in Natur und Technik die Vorteile der Gestaltoptimierung mittels adaptivem Wachstums nachweisen und dessen positive Auswirkungen auf die Versagenssicherheit zeigen. Wie vorangestellt erläutert, muß man trotz ihrer unbestreitbar optimalen Außenkontur dennoch Schadensfälle bei Bäumen registrieren. Gerade die angesprochenen Schadensfälle, die mit Längsspaltungen einhergehen, sind nicht durch Gestaltoptimierung zu verhindern, bzw. das Schadensrisiko kann dadurch nur marginal verringert werden. Aber nicht jeder gekrümmte Stamm oder Ast versagt, indem er axial aufreißt. Nicht jeder Wurzelanlauf delaminiert aufgrund der unvermeidlichen Querspannungen in diesem Bereich. Auch unterkritisch hohlen Bäumen ist oft ein noch langes Leben beschieden, ihr Versagen ist also nicht zwangsläufig, z. B. wenn eine Kronenreduktion die Schwächung des Stammes ausgleicht. Gemessen an der Vielzahl solcher nicht versagter Risikostrukturen ist die Schadensrate eher gering. Aufgrund dieser Beobachtungen müssen folgende Fragen gestellt werden:

Wie schützt sich der Baum gegen die oben aufgeführten Schadensfälle? Welche Möglichkeiten besitzt er durch innere Anpassung? Welche Bauelemente und Strategien hat die Natur entwickelt? Existieren prinzipielle Konzepte zur Schadensverhinderung? Das heißt mit anderen Worten:

Existiert neben der unbestreitbaren äußeren Optimierung auch eine innere Optimierung, und wie wird diese in einer Struktur realisiert, die nur auf ihrer Oberfläche zuwachsen kann?

5. Methoden

5.1. Verwendete Rechenmethoden

5.1.1. Das CAO-Verfahren

Mit CAO (Computer Aided Optimization) wurde von MATTHECK (1990a) ein computer-gestütztes Berechnungsprogramm entwickelt, das sowohl in der Gestaltoptimierung technischer Komponenten als auch zur Wachstumssimulation biologischer Lastträger eingesetzt wird (MATTHECK & BURKHARDT 1990). Die erforderlichen Spannungsberechnungen kann nahezu jedes kommerzielle FEM-Programm erledigen. Das CAO-Paket, welches der Struktur dann das nötige "Leben einhaucht", muß nur an die jeweiligen Ein- und Ausgaberroutinen des verwendeten FEM-Codes angepaßt werden. Die einfache und universale Anwendbarkeit des Programms für beide oben genannten Gebiete wird an einer großen Zahl von Beispielen von MATTHECK (1992b) belegt. Die berechnete Struktur wird durch adaptives lastgesteuertes Wachstum in den Zustand einer gleichmäßigen Spannungsverteilung auf der Oberfläche gebracht.

Die Simulationsrechnung natürlicher Wachstumsprozesse von pflanzlichen Lastträgern mit der Fähigkeit zu sekundärem Dickenwachstum wird durch die einfache Kopie dessen realisiert, was das Kambium der Bäume macht. Es lagert dort verstärkt Material an (Wachstum), wo Bereiche hoch belastet sind und zeigt geringes oder kein Wachstum, wo vergleichsweise niedrige Belastungen vorherrschen. Im Bereich der Bauteiloptimierung und der Simulation von Knochenwachstum¹² wird zusätzlich auch die Option *Schrumpfen* zugelassen. Da beides jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, sei hier auf MATTHECK (1992b) und WALTHER (1993) verwiesen.

Der Verfahrensablauf der CAO-Methode soll hier nur kurz und allgemeingültig skizziert werden.

1. Erzeugen einer FEM-Struktur, die in groben Zügen das gewünschte Aussehen des zu optimierenden Bauteiles hat. Hierbei wird durch Lagerung, Werkstoffkennwerte und Krafteinleitung der spätere Einsatz nachgebildet.
2. Aufbringen einer dünnen Elementschicht auf der Bauteiloberfläche (sie entspricht dem Kambium der Bäume) an jenen Stellen, an denen Veränderungen (Wachsen und Schrumpfen) gewünscht werden.
3. In einer FEM-Analyse wird die von Mises-Vergleichsspannung¹³ (σ_V) für die Oberflächenknoten der Wachstumsschicht berechnet.

¹² Knochen können durch spezielle Zellen sowohl Material anlagern (Osteoblasten) als auch entfernen (Osteoclasten).

¹³ Die Vergleichsspannung nach von Mises bzw. der Gestaltänderungsenergiehypothese überführt einen mehrachsigen Spannungszustand in einen einachsigen. Sie ist ein anerkanntes Kriterium für verformbare Werkstoffe, die bei Auftreten plastischer Deformation versagen und bei schwingender Beanspruchung mit Versagen durch Dauerbruch reagieren (BEITZ & KÜTTNER 1987).

4. Die Spannungsverteilung wird einer Temperaturverteilung gleichgesetzt ($\sigma_V = \text{Temperatur}$). Mit anderen Worten: Orte hoher Spannung erhalten eine hohe Temperatur, Orte geringer Spannung sind entsprechend kälter. Zusätzlich wird mittels einer frei wählbaren Referenzspannung σ_{Ref} das auf der Oberfläche zu erreichende Spannungsniveau bestimmt. Jetzt wird der E-Modul auf der Oberfläche reduziert und gleichzeitig diesen Elementen ein thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha > 0$ zugewiesen.
5. Befreit von Randbedingungen und Belastung kann sich in diesem Berechnungsschritt die weiche Oberflächenschicht gemäß ihrer Temperaturbelastung frei ausdehnen. Analog zu: hohe Spannungen = hohe Temperatur dehnen sich jetzt diejenigen Bereiche besonders stark aus, die mit einer hohen Temperatur beaufschlagt worden sind.
6. Die spannungsgesteuerten, thermischen Verschiebungen der äußeren Knoten werden zu den anfänglichen Knotenkoordinaten addiert und eventuell notwendige Netzkorrekturen durchgeführt. Erfüllt die modifizierte Geometrie des FE-Modells die in sie gesetzten Erwartungen (weitgehende Spannungskonstanz auf der Oberfläche, genügend großer Wachstumsschritt etc.) ist die Prozedur beendet, falls nicht, werden die einzelnen Berechnungsschritte ein weiteres Mal durchlaufen.

MATTHECK (1992b) und WALTHER (1993) weisen in ihren Arbeiten ausdrücklich auf die guten Ergebnisse auf dem Gebiet der Wachstumssimulation mit Hilfe von CAO hin. Die im Kapitel 6.4 durchgeführte Simulation des sekundären Dickenwachstums eines Wurzelanlaufes basiert auf diesen Erfahrungen. Die speziellen, vom allgemeinen CAO-Ablauf abweichenden Details für den dort behandelten Berechnungsfall werden an jener Stelle aufgezeigt und erläutert.

5.1.2. Das CAIO-Verfahren

Im Forschungszentrum Karlsruhe wurde von KRIECHBAUM *et al.* (1992) das CAIO-Verfahren (Computer Aided Internal Optimization) zur Optimierung der Faserorientierung in Verbundwerkstoffen entwickelt. Mit dem CAIO-Verfahren¹⁴ kann das Verhalten eines vorgegebenen Materials mit lokal orthotropem Werkstoffverhalten durch Vorgabe beliebiger Orientierung der Materialkenngrößen bei der linear-elastischen FEM- Spannungsanalyse berücksichtigt werden.

Wie schon das CAO-Verfahren baut auch das CAIO-Verfahren auf einem Designprinzip aus der Natur auf. Diese Gestaltungsregel lautet: *minimiere die Schubspannungen durch Orientierung der orthotropen Materialeigenschaften in Richtung der Hauptnormalspannungstrajektorien*. Die richtungsabhängigen Kenngrößen bzw. Eigenschaften des Materials werden somit optimal ausgenutzt. Knochen erreichen dies durch einen orientierten Fachwerkaufbau ihrer Trabekel in der Spongiosa, die dann nur noch auf Zug oder Druck belastet werden (CURREY 1984). Bäume vermeiden Schub zwischen den Jahresringen, indem sich der neu zuwachsende Ring entlang des momentanen Kraftflusses ausrichtet (MATTHECK *et al.* 1989 und MATTHECK 1991).

¹⁴ Das CAIO-Verfahren ist bislang auf die Berechnung zweidimensionaler Strukturen beschränkt.

Es ist bekannt, daß die Hauptnormalspannungen in den drei zueinander senkrecht stehenden Flächen auftreten, in denen die Schubspannung τ zu Null wird. Diesen Umstand macht sich der Berechnungsalgorithmus von CAIO zu Nutze. Mit den aus der FEM-Analyse stammenden Spannungswerten werden für jedes Element die Orientierung der Hauptspannungen berechnet und die orthotropen Materialkonstanten parallel zu dieser Orientierung ausgerichtet. Die Richtung der betragsmäßig größten Hauptnormalspannung bestimmt dabei die Richtung des höchsten E-Moduls, der kleinere liegt somit zwangsläufig senkrecht dazu, in der von x und y aufgespannten Ebene. Da sich durch diesen Prozeß die Materialorientierungen im FEM-Modell geändert haben, wird für dieses *neue* Modell eine weitere FEM-Spannungsanalyse erforderlich. Dieser iterative Prozeß wird solange durchgeführt, bis die Schubspannungsreduktion eine zuvor gesetzte Schranke unterschreitet. Die so erreichte Anordnung der Materialdaten ermöglicht eine weitgehend schubspannungsfreie Struktur. Sie gleicht in ihrer Materialorientierung in weiten Teilen dem natürlichen Baumvorbild und bildet somit eine gute Ausgangssituation für die Querspannungsberechnungen, wie sie in Kapitel 6.2 vorgestellt werden.

5.2. Verwendete Meßmethoden

Die heute üblichen Probenkörper zur Bestimmung der Querspannung von Holz (siehe Abb. 10) führen stets zu einer inhomogenen Spannungsverteilung zwischen den Kerben.

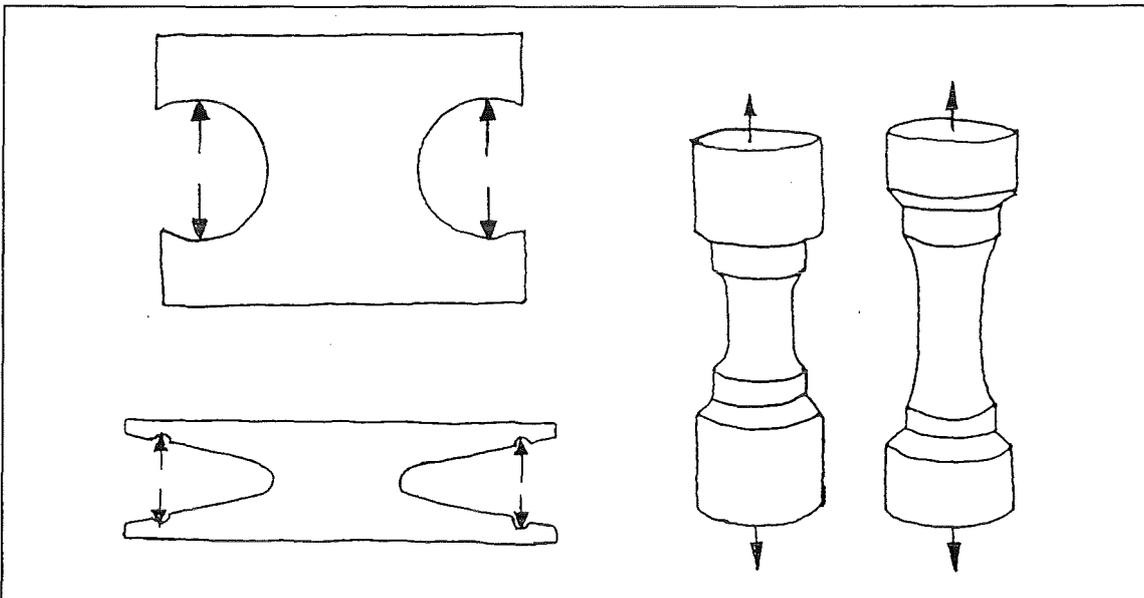


Abbildung 10: Einige der heute üblichen Probenkörper zur Bestimmung der Querspannung von Holz. Links Proben mit Kerben, rechts Hantelproben.

Der Einfluß der Kerbe auf das Meßergebnis wurde bereits von JENKIN (1926) kritisch bemerkt und später von weiteren Autoren beschrieben. Ihre Ergebnisse wurden von KEYLWERT (1951) zusammengefaßt. Darüber hinaus konnte BETHGE *et al.* (1994) durch FE-Rechnungen auch einen Einfluß der Orthotropieverhältnisse auf die Spannungsverteilung nachweisen. Überdies geht den Messungen mit oben angegebenen Probenkörpern eine langwierige und schwierige Holzlagerung voraus, da Trocknungsriss im Ausgangsmaterial unbedingt zu vermeiden sind. Der Lagerung folgt eine teure Probenferti-

gung und aufwendige Dokumentation, welchem Baumteil die jeweilige Probe zuzuordnen ist. Weiter werden für das Zerschneiden der Holzproben teure Prüfmaschinen eingesetzt.

Die vorgeschriebene Probengröße für die Querfestigkeitsermittlung nach ASTM von 50,8 x 63,5 x 50,8 mm Kantenlänge (NIEMZ, 1993) wäre zudem zu groß, um Festigkeitsprofile zu erstellen, wie sie in Kapitel 6.2 gezeigt sind.

Bei der Auswahl der geeigneten Meßmethoden stand die Verwendbarkeit im Feld im Vordergrund, da nach einem Optimierungsmechanismus des lebenden, also grünen Baumes gesucht wurde. Die Holzproben sollten in möglichst frischem Zustand (unverfälschter Feuchtegehalt, keine Trocknungsrisse) gebrochen werden. Auch sollte die Meßmethode genügend kleine Probenkörper zulassen, damit Festigkeitsverteilungen ermittelt werden können.

Für die Bewertung grüner Holzproben aus stehenden Bäumen wurde in der Abteilung für Biomechanik des Forschungszentrums Karlsruhe zwei Holzprüfmaschinen, das Fractometer I und II entwickelt. Diese werden von der Fa. IML in Lizenz produziert und sind europaweit akzeptierte Meßgeräte im Baumsachverständigenwesen (IML 1994a).

5.2.1. Das Fractometer I

Das Fractometer I ist eine rein mechanische Prüfmaschine im Taschenformat zur Bestimmung der radialen Biegefestigkeit von Holz durch Biegen und Zerschneiden eines Bohrkernes, der mit einem Zuwachsbohrer entnommen wurde.

Der Aufbau und das Wirkprinzip des Fractometer I wird in Abbildung 11 anhand einer Skizze und Explosionszeichnung veranschaulicht.

Das Fractometer I bestimmt nach MATTHECK & BETHGE (1992, 1993) die drei mechanischen Größen: Elastizitätsmodul, Bruchspannung und Bruchenergie. In dieser Arbeit werden ausschließlich die radialen Biegefestigkeitswerte ermittelt, weshalb im folgenden nur dieser Meßvorgang ausführlich beschrieben wird.

Zur Ermittlung des radialen Bruchkennwertes wird zunächst ein Bohrkern in der in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Art und Weise dem Baum entnommen. Der Bohrkern wird in die Einspannung eingesteckt. Dabei ist darauf zu achten, daß die Längsfasern parallel zur Deckfläche des Fractometers liegen (siehe Abb. 12). Mit solch einer Bohrkernplatzierung werden die Holzstrahlen hochkant, in Richtung ihrer größten Steifigkeit gebogen. Die reguläre Windbelastung wird somit simuliert (MATTHECK *et al.* 1994d).

Nach Platzierung des Bohrkernes wird der Bodendeckel des Fractometer gedreht (von oben gesehen im Uhrzeigersinn). Die Grobanzeige für die Belastung wandert in der seitlich angebrachten Skala, die Feinanzeige ist auf den Umfang des Drehbodens geprägt. Durch fortlaufendes Drehen wird der Bohrkern bis zum Bruch belastet. Ist der Bruch der Probe vollzogen, wird die dazu benötigte Kraft an Skala und Bodendeckel in Fractometereinheiten abgelesen.

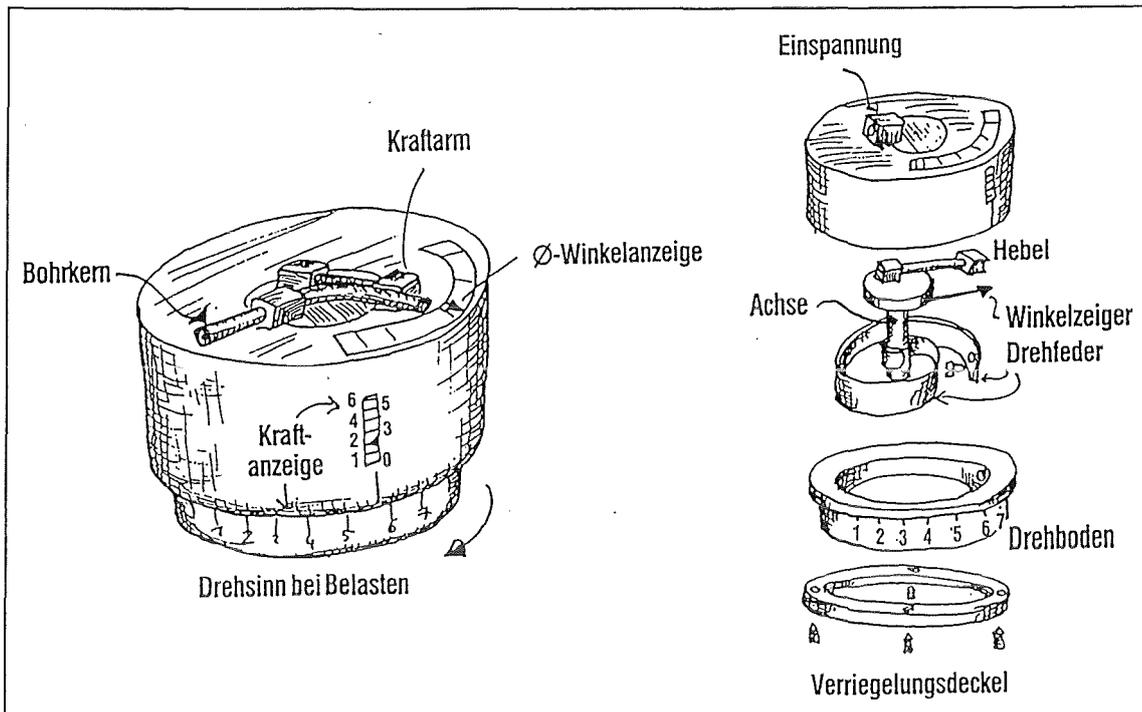


Abbildung 11: Wirkprinzip des Fractometer I mit eingespannter Bohrkernprobe (links) und Explosionszeichnung mit den wesentlichen Bestandteilen (rechts) nach MATTHECK & BRELOER (1993)

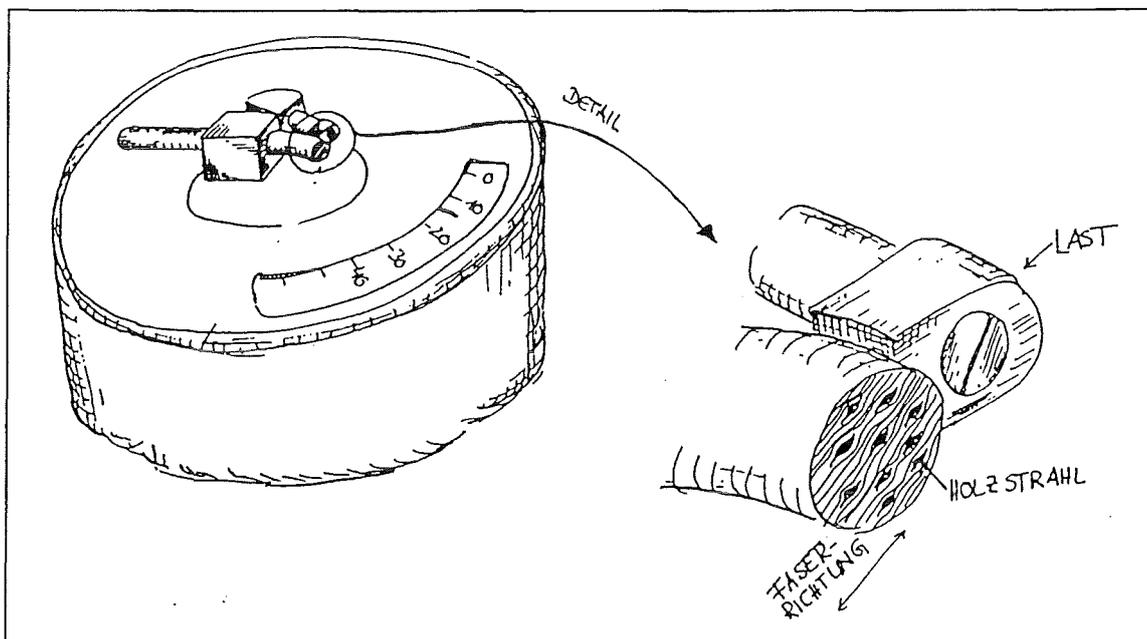


Abbildung 12: Zur Bestimmung der radialen Biegefestigkeit muß der Bohrkern in der skizzierten Weise in das Fractometer eingespannt werden. (Zeichnung: C. Mattheck)

Die Fractometereinheiten können anhand der jeweiligen Fractometereichkurve in SI-Einheiten umgerechnet werden. Nach Rückstellen der Drehfeder auf ihren Nullwert wird der Bohrkern um ca. 11 mm weiter geschoben, und eine neue Messung kann erfolgen. Auf diese Weise erhält man entlang des Bohrkerns im Abstand von ca. 11 mm je einen Meßwert. Die Messungen sind zügig durchzuführen, um Kriechvorgänge des Holzes bei

lang anstehender Belastung gering zu halten. Kriechen heißt hier, ein allmähliches Zunehmen des Biegewinkels, ohne daß die Belastung erhöht wird.

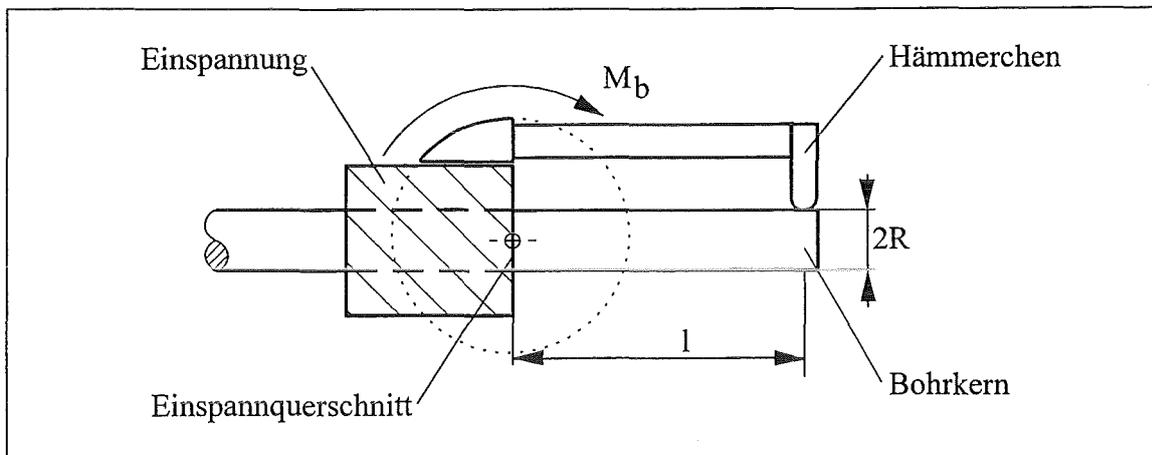


Abbildung 13: Skizze der für die Biegebruchspannungsberechnung benötigten Abmessungen und Lagerungssituation der Bohrprobe beim Fractometer I.

Die Berechnung der Biegebruchspannung bzw. Querfestigkeit aus den abgelesenen Fractometereinheiten kann z. B. nach BEITZ & KÜTTNER (1987) wie folgt vorgenommen werden. Die Kraft F wirkt über einen definierten Abstand l als Moment M_b auf den Bohrkern und induziert im Einspannquerschnitt die Biegespannung σ_b (siehe Abb. 13). Unter Zugrundelegung der Bernoulli'schen Biegetheorie ergibt sich für den Einspannquerschnitt der Bohrprobe die maximale Biegespannung

$$\sigma_{b,\max} = \frac{FlR}{I_0}$$

mit dem axialen Flächenmoment 2. Grades für Kreisquerschnitte

$$I_0 = \frac{\pi}{4} R^4$$

folgt

$$\sigma_{b,\max} = F \frac{4l}{\pi R^3}$$

Wird die von der Probe maximal ertragbare Spannung $\sigma_{b,\max}$ überschritten, kommt es zum Bruch der Probe. Der dabei nutzbare Meßbereich des Fractometer I reicht von 10,5 MPa (Vorspannungswert der Drehfeder) bis 34 MPa bei den Modellen der Baureihe 150.

Beim Fractometer I wird das *Hämmerchen* am Ende des Kraftarms auf einer Kreisbahn geführt. Diese besitzt als Drehzentrum den Einspannquerschnitt der Bohrkerns. Die Einleitungsrichtung der Kraft steht hierdurch immer senkrecht auf dem freien Ende des einseitig eingespannten Bohrkerns. Der Kraftangriffspunkt bzw. der Hebelarm ändern sich während der Belastung nicht. Die oben verwendeten Formeln zur Berechnung der Bie-

gebruchspannung im Einspannquerschnitt der Bohrprobe gelten daher auch bei großen Biegewinkeln. Dies ist besonders bei zäh brechenden Holzproben von Vorteil.

5.2.2. Das Fractometer II

Wie das Fractometer I ist auch das Fractometer II ein leicht zu bedienendes, rein mechanisches Meßgerät zur Bestimmung von Holzkennwerten aus Bohrkernen.

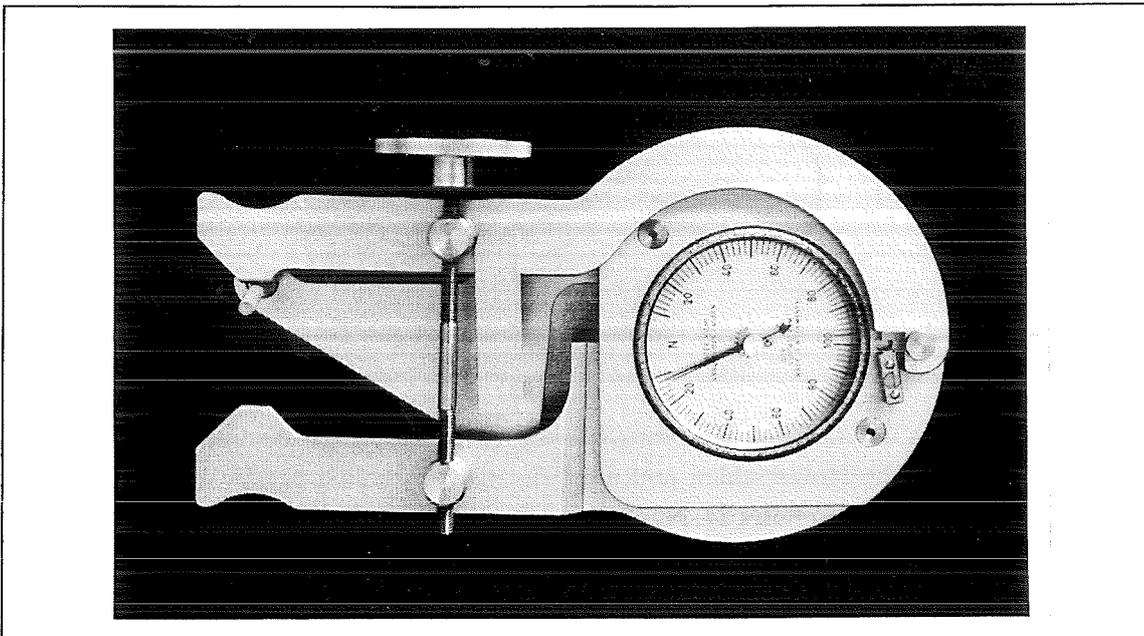


Abbildung 14: Das Fractometer II mit aufgesteckter Handkurbel. (Photo: A. Zipse)

Die Belastung kann zum einen durch das Zusammendrücken zweier Hebel (der Handhabung einer Zange nicht unähnlich) oder durch kontinuierliches Drehen einer Kurbel mit Gewindestange aufgebracht werden. Im Falle des Fractometer II sind zwei Halterungen vorgesehen, um den Bohrkern zu plazieren. Im einen Fall wird der Bohrkern in ähnlicher Weise wie beim Fractometer I gebogen und somit seine Biegebruchfestigkeit bestimmt. Die zweite Positionierung führt zu einer seitlichen Kompression des Bohrkerns und damit zur Bestimmung seiner Druckfestigkeit. Auf einer handelsüblichen Federwaage, wie sie zur Prüfung des Abzugswiderstandes von Gewehren und Pistolen gebräuchlich ist, lassen sich die Werte für die verschiedenen Festigkeiten ablesen. Abbildung 15 verdeutlicht, wie der Bohrkern im Fractometer II zur Bestimmung der radialen Biegebruchfestigkeit plaziert werden muß.

Durch Zusammenführen der beiden Griffe wird das freie Ende des Bohrkerns wie ein Kragträger in der gezeigten Weise belastet. Dies entspricht in der wesentlichen Funktionsweise dem Fractometer I. Sie führt zu einer Biegebelastung im Bohrkern, die im Einspannquerschnitt maximal ist. Wird die ertragbare Spannung überschritten, versagt der Bohrkern durch Abbrechen an dieser Stelle. Die Meßuhr besitzt einen Schleppzeiger. Damit läßt sich auf der Rundskala die Biegebruchfestigkeit ablesen. Sie ist die maximal ertragene Spannung der Holzprobe. Die bestimmenden Abmessungen (Bohrkerndurchmesser, freie Bohrkernlänge) wurden analog denen des Fractometer I gewählt.

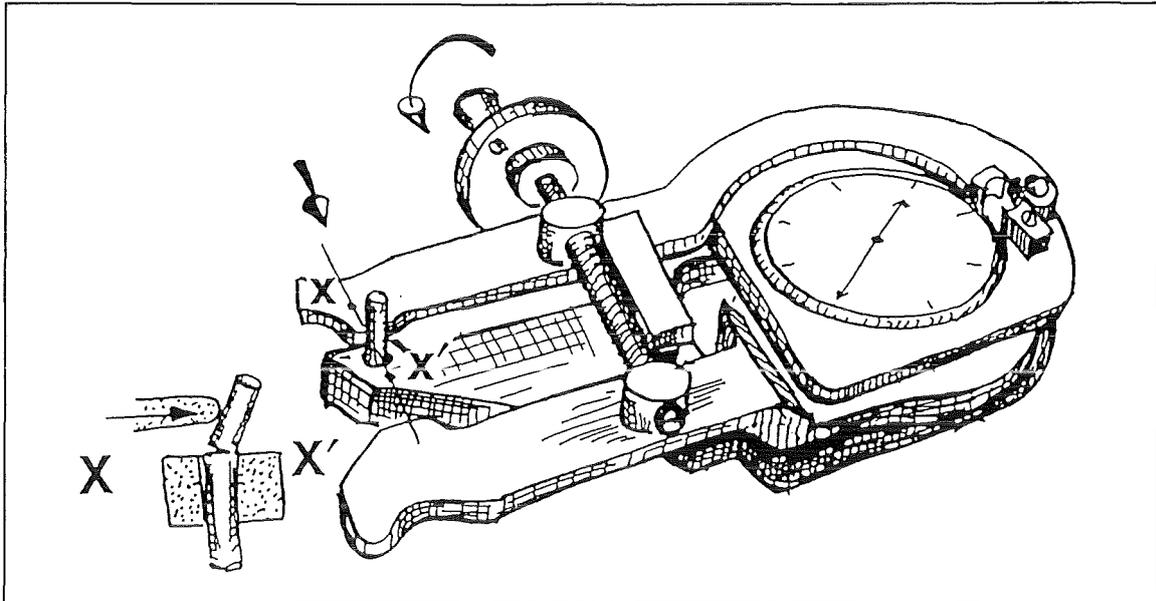


Abbildung 15: Zum Bestimmen der radialen Biegefestigkeit mit dem Fractometer II muß der Bohrkern in der unteren Probenaufnahme plaziert werden. (Zeichnung: C. Mattheck)

Bei der Ermittlung der radialen Biegebruchfestigkeit ist darauf zu achten, den Bohrkern so einzulegen, daß die Holzstrahlen und die Längsfasern parallel zur Belastungsrichtung liegen (identisch zu Fractometer I). Nur so sind Vergleiche mit den mit dem Fractometer I ermittelten Werten möglich bzw. erlaubt (MATTHECK *et al.* 1994c).

Das Fractometer II kommt im Gegensatz zum Fractometer I konstruktionsbedingt ohne Vorspannung der Meßeinrichtung aus. Es können dadurch auch Festigkeitsverteilungen entlang Bohrkernen ermittelt werden, die, bedingt durch ihre geringen radialen Festigkeitswerte, bereits unter der Vorspannungslast des Fractometer I brechen würden. Dieser Umstand ermöglicht auch das *Fractometrieren* von Bäumen mit im allgemeinen nur geringen radialen Festigkeitswerten wie Pappel, Weide und fast sämtliche einheimische Nadelhölzer. Der nutzbare Meßbereich des Fractometer II reicht von 0 MPa bis 44,8 MPa (Bruchspannung im Einspannquerschnitt der Bohrprobe).

Durch den speziellen Aufbau des Fractometer II steht die Richtung der Krafteinleitung nicht mehr senkrecht zur Probenachse sobald sich der Bohrkern unter der Belastung verbiegt. Bei einem mittleren Biegebruchwinkel von etwa 15° und unter Vernachlässigung der Reibung zwischen Bohrkern und Kraftarm ergibt sich ein theoretischer Unterschied zwischen abgelesenem Kraftwert und der tatsächlich für den Probenbruch verantwortlichen Kraft von ca. 3%. Angesichts des großen Streubereichs, der radialen Biegefestigkeitswerte für Holz, ist dieser Unterschied jedoch vernachlässigbar klein.

5.2.3. Der Resistograph

Bohrwiderstandsmessungen dienen seit einigen Jahren der Beurteilung der Bruchsicherheit von Bäumen und dem Zustand von Bauholz (RINN 1989 und GÖRLACHER & HÄTTICH 1994). Diese Messungen werden mit sog. Resistographen durchgeführt. Diese messen den mechanischen Widerstand an einer Bohrnadel, die mit konstanter Drehzahl und Vor-

schubgeschwindigkeit in das Holz eindringt. Nach ECKSTEIN & SAB (1994) gibt der Bohrwiderstand Auskunft über Struktur und Zustand des Holzes im Stamminnern, wobei die Holzfeuchte die Meßwerte modifiziert.

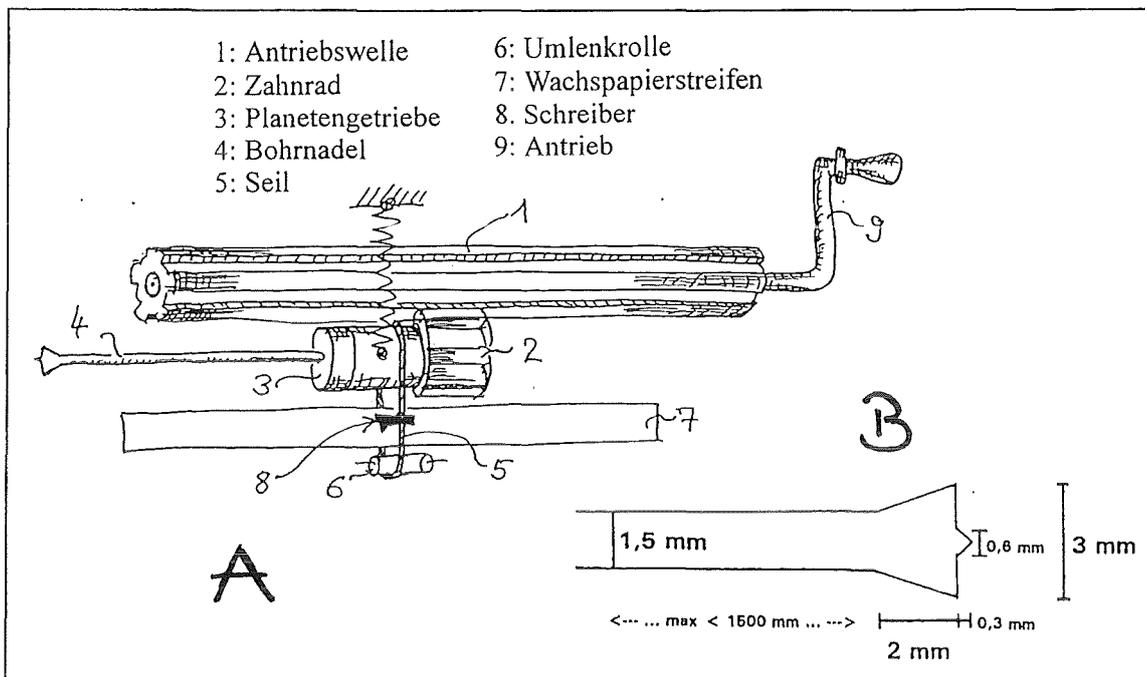


Abbildung 16: Prinzipskizze und Wirkungsweise des Resistographen-M300 (A) (Zeichnung: C. Mattheck) und Abmessungen des Bohrnadelkopfes (B) (IML 1994b).

Nach RINN (1992) setzt sich der Bohrwiderstand aus der Zerspanungs- und Verdrängungsarbeit an der Nadelspitze und aus der Reibung des Bohrnadelschaftes im Bohrkanal zusammen. Die drei Komponenten des Bohrwiderstandes hängen von der lokalen Rohdichte und der Holzfeuchte ab, wobei mit zunehmender Eindringtiefe der Anteil der Reibung am Gesamtbohrwiderstand zunehmend größer wird. ECKSTEIN & SAB (1994) konnten nachweisen, daß dieser Bohrtrend eine verfahrensbedingte Größe ist, die nur durch Umkehrbohrung, also durch eine Bohrung von der gegenüberliegenden Seite, von dem Alterstrend¹⁵ unterschieden werden kann. Hierbei beeinflusst die mittlere Rohdichte und der Feuchtegehalt des Holzes das Niveau des Bohrwiderstandprofils. Höhere Rohdichten oder ein höherer Feuchtegehalt haben im allgemeinen einen größeren Bohrwiderstand zur Folge. Eine direkte Korrelation des Bohrwiderstandes mit der Holzfestigkeit ist bisher nicht bekannt. Vom DEPARTMENT OF AGRICULRURE (1982) und von KOLLMANN (1952) werden jedoch Angaben zur Korrelation von Dichte und Holzfestigkeit gemacht. Somit wäre der Bohrwiderstand ein indirektes Maß für die Holzfestigkeit. Die Angaben variieren aber von Autor zu Autor stark und gelten jeweils nur für einen definierten Feuchtegehalt. Somit müßte parallel zur Bohrwiderstandsmessung auch eine Feuchtemessung durchgeführt werden, um eine eindeutige Bohrwiderstand-Dichte-Festigkeitsrelation zu erhalten.

¹⁵ Als Alterstrend bezeichnet man das Ansteigen des Bohrwiderstands aufgrund der Zunahme der Gefäßanteile in älteren Baumbereichen.

Die Resistographenmessungen für die vorliegende Arbeit wurden mit dem Resistograph-M300 durchgeführt (IML 1994b). Er wurde von der Fa. IML in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt. Er ist bis auf den Elektroantrieb ein rein mechanisches Meßgerät für den Feldgebrauch. Den Resistographen-M300 könnte man salopp auch als *intelligente* Bohrmaschine bezeichnen. Sie merkt sich via Wachspapierstreifen wie hoch der Bohrwiderstand (bei konstant gehaltenem Vorschub und Drehzahl) der Bohrnadel auf ihrem Weg durch das Holz an jedem Ort war. Abbildung 16 (A) zeigt in einer stark vereinfachenden Skizze den prinzipiellen Aufbau und die Wirkungsweise des Resistographen-M300. Der Bohrnadelkopf hat eine Breite von 3 mm und ist mit einer Zentrierspitze versehen. Der Nadelschaft besitzt einen Durchmesser von 1,5 mm (siehe Abb. 16 Teilbild B).

Baumart	Getriebestufe (Vorschub)		
	1 (20 mm/ min)	2 (40 mm/ min)	3 (60 mm/ min)
Edelkastanie		×	×
Buche	×		
Birke		×	×
Eiche	×		
Ahorn	×		
Esche	×	×	
Pappel			×
Weide			×
Fichte		×	×
Tanne			×

Tabelle 1: Auswahl einiger heimischer Baumarten und Empfehlung der Vorschubgeschwindigkeiten, mit denen diese gebohrt werden können.

Die Meßschriebe des Resistographen zeigen den Bohrwiderstand (y-Achse) über der Eindringtiefe der Bohrnadel (x-Achse). Der Aufschrieb erfolgt im Maßstab 1:1, d. h. 1 cm der x-Achse auf dem Wachspapierstreifen sind gleichbedeutend mit 1 cm zurückgelegtem Bohrweg. Die Breite des Wachspapierstreifens begrenzt den Meßbereich nach oben. Damit mit ein und demselben Gerät dichte Hölzer (Eiche, Buche etc.) und weniger dichte Holzarten (Pappel, Kastanie, Fichte etc.) gleichermaßen untersucht werden können, kann das Niveau des Bohrprofils mittels dreier Getriebestufen geregelt werden. Es muß sichergestellt sein, daß die maximalen Ausschläge noch innerhalb des möglichen Aufzeichnungsbereiches zu liegen kommen.

Die Getriebe sind derart untersetzt, daß alle heimischen Baumarten mit nur einem Grundgerät gebohrt werden können. Die Getriebe haben direkten Einfluß auf die Vor-

schubgeschwindigkeit und die Drehzahl. Tabelle 1 gibt Auskunft darüber, welche Holz- bzw. Baumart (Auswahl einiger heimischer Holzarten) mit welcher Getriebestufe gebohrt werden kann.

5.3. Vorgehensweise beim Messen

5.3.1. Bohrprobenentnahme

Zur Probenentnahme für die Fractometermessungen wurden handelsübliche Zuwachsbohrer der Firma Suunto eingesetzt.

Die große Steigung des Außengewindes auf dem Bohrerkopf bewirkt einen hohen Vorschub des Hohlbohrers beim Eindrehen in das Holz. Die Bohrproben werden durch diese Konstruktion der Bohrer sowohl aus dem Holz herausgestanzt als auch geschnitten. Angesichts des hohen Bohrvorschubes pro Schneidenumdrehung überwiegt dabei der Stanzanteil. Die Zuwachsbohrer der Längen 20 - 40 cm besitzen einen Innendurchmesser an der Schneide von 5 mm.

Es ist darauf zu achten, nur qualitativ hochwertige Bohrer mit einem einwandfreien, scharfen Anschliff zu verwenden. Ungleichmäßig angeschliffene und beschädigte Zuwachsbohrer ergeben nur unbefriedigende Bohrergebnisse. Die entnommenen Bohrkern sind dann rau oder bereits stark vorgeschädigt. Diese Ungleichmäßigkeit der Proben kann sich, insbesondere bei Spezies mit geringen Querfestigkeiten besonders nachteilig auf das Meßergebnis auswirken. Eine ausführliche Schärfe- und Pflegeanleitung wird in SUUNTO (1993) gegeben. Die Innenwand des Zuwachsbohrers sollte sauber und glatt sein. Andernfalls könnte der Bohrkern, beim Einbringen des Bohrers in den Baum, auf Torsion belastet und eventuell beschädigt werden. Gerade beim Bohren von stark harzenden Nadelbäumen empfiehlt es sich, den Bohrer häufig zu reinigen.

Im interessierenden Bereich (hier: Wurzelanlauf, gekrümmter Ast oder Stamm) wird senkrecht zur Baumoberfläche in Richtung des Markes gebohrt. Die Bohrkernachse liegt somit parallel zu den Holzstrahlen und steht senkrecht auf den Jahresringen (siehe Abb.17). Sämtliche Bohrungen entlang der Krümmung werden aus der gleichen Radialebene entnommen. Diese Ebene wird so gewählt, daß sie bei senkrechter Betrachtung die größte Krümmung in der ausgesuchten Baumkontur hat. Dabei sollte die Hauptwind- und somit Belastungsrichtung parallel zur Bohrrichtung liegen. Die Bohrkern werden von der Innenseite der Krümmung, also der sog. Zugseite der Biegung entnommen. Falls die Struktur dies zuläßt, sollte ganz durchgebohrt werden.

Damit möglichst viele Meßwerte aus dem untersuchten Bereich erhalten werden, sollten die Entnahmeorte für die Bohrproben ca. 4 - 5 cm auseinanderliegen. Ein geringerer Abstand der Bohrlöcher ist nicht zu empfehlen. Die konische Bohrspitze der Zuwachsbohrer führt beim Eindrehen zu Tangentialspannungen im Baum, die wiederum zu Längsrissen führen können. Beim Setzen einer weiteren Bohrung muß ausgeschlossen werden, daß aus einem derart beeinflussten Bereich eine Probe entnommen wird.

Mit einem Metallöffel wird der Bohrkern aus dem Zuwachsbohrer entfernt. Die tatsächliche Probenlänge sowie der Anteil der Rinde wird notiert. Jetzt kann auch die visuelle

Kontrolle des Bohrkerns durchgeführt werden: Wurde tatsächlich senkrecht zu den Jahresringen und in Richtung der Holzstrahlen gebohrt? Gibt es Unregelmäßigkeiten, Einschlüsse, Faulstellen, lose Jahresringe, Drehwuchs usw.? Sämtliche Irregularitäten und Auffälligkeiten werden notiert, um später in der Festigkeitsdarstellung berücksichtigt zu werden.

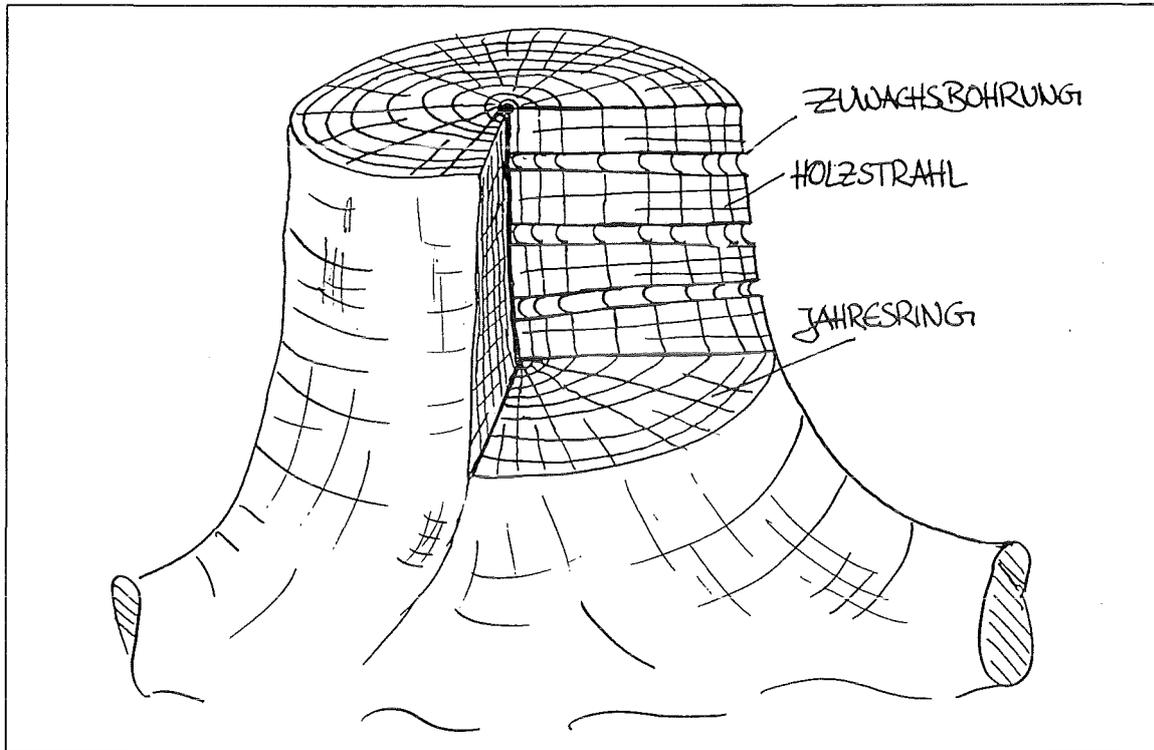


Abbildung 17: Prinzip der Bohrkernentnahme am Beispiel eines Wurzelanlaufes.

Die hier beschriebene Art der Probenentnahme gilt speziell für diese Arbeit. Andere Zielsetzungen, nämlich die Bestimmung tangentialer Festigkeiten, können eine davon abweichende Arbeitsweise erfordern. Diese hängt ganz von den verfolgten Zielen ab und kann deshalb nicht verallgemeinert werden.

5.3.2. Messen mit dem Fractometer

Der Bohrkern wird, wie oben ausführlich beschrieben, senkrecht zur Oberfläche in Richtung des Markes entnommen. Zur Messung eignen sich keine Bäume mit Drehwuchs¹⁶ oder Ästen im Untersuchungsbereich. Auch nur kleine Äste stören den normalen Faserverlauf in ihrer nächsten Umgebung ganz erheblich. Von SHIGO (1990) wird das Prinzip, wie die Astschwänzchen und die Stammfasern mit und ineinander verwebt sind, verdeutlicht. Es wird sofort einsichtig, daß sich ein Bohrkern aus solch einem Gebiet hinsichtlich seiner Querfestigkeit anders verhält als ein Bohrkern aus einem ungestörten Bereich.

¹⁶ Faserabweichungen von der Richtung der Stammachse werden nach BOSSHARD (1984) als Drehwuchs bezeichnet. Die Abweichung kann links- oder rechtsgedreht auftreten. Im allgemeinen zei-

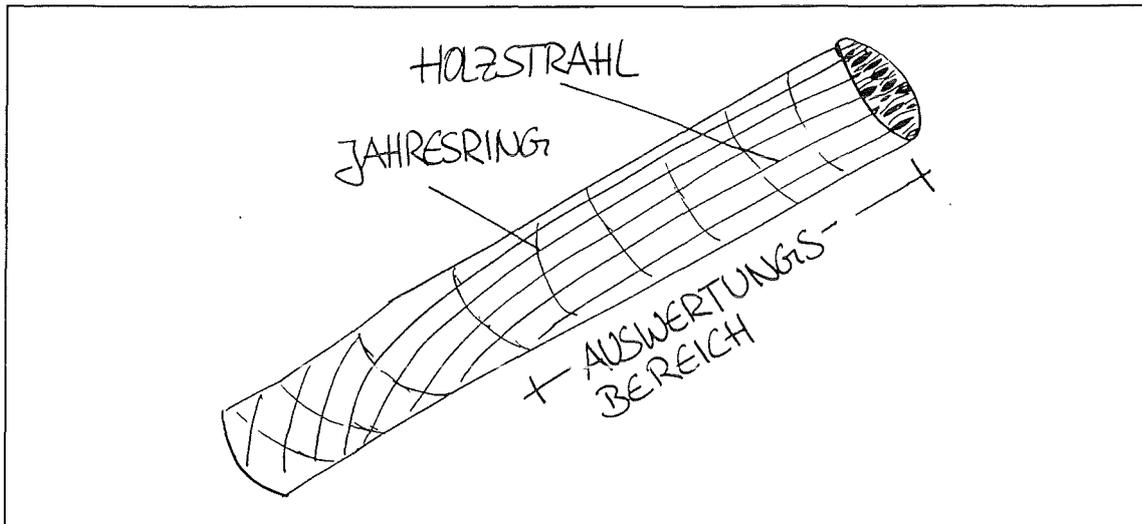


Abbildung 18: Der Bohrkern wird jeweils nur so weit ausgewertet, wie die Holzstrahlen parallel zur Bohrkernachse verlaufen.

Prinzipiell kann das ganze Jahr über gemessen werden. Die Erfahrung hat aber gezeigt, daß Messungen nach langanhaltenden Frösten vermieden werden sollten. Das Holz ist über weite Bohrkernbereiche bröselig und leicht zwischen den Fingern zu zerreiben. Es hat dort keinerlei mit dem Fractometer erfassbare Festigkeit mehr. Der so teilweise aufgelöste Bohrkern läßt keine genaue örtliche Zuordnung der Festigkeitsmeßwerte im Baum zu.

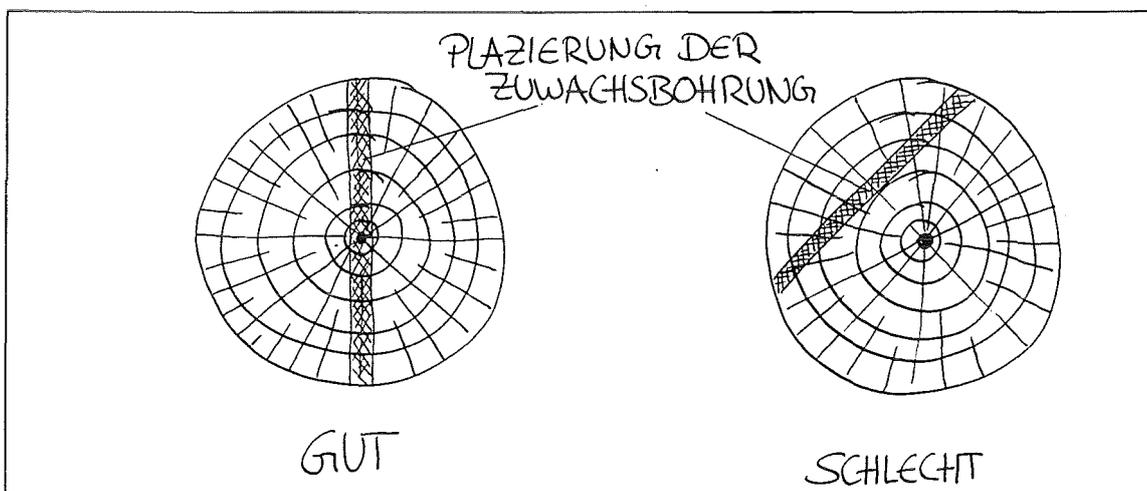


Abbildung 19: Wird nicht radial gebohrt, steht die Bohrkernachse nicht normal auf den Jahresringen, und die Holzstrahlen verlaufen nicht parallel zur Probenachse.

Ist der Bohrkern entnommen, alle Maße und Auffälligkeiten notiert, sollte dieser so zügig wie möglich fractometriert werden. Dies ist besonders an heißen, trockenen Tagen oder bei sehr langen Bohrkernen wichtig, damit dieser nicht austrocknen kann. Die Festigkeitswerte für Holz nehmen mit abnehmendem Feuchtegehalt erheblich zu (BOSSHARD 1984, KOLLMANN 1951, NIEMZ 1993, WAGENFÜHR & SCHEIBER 1989). Eine

gen alle Baumindividuen während ihres Wachstums bzw. in bestimmten Wachstumsabschnitten mehr oder minder Drehwüchsigkeit.

Beeinflussung der Meßwerte durch diesen Effekt muß unbedingt vermieden werden. Damit der natürliche Feuchtegehalt, wie er im gerade angebohrten Baumabschnitt vorherrscht, nicht verfälscht wird und auch ein eventuell existierender Feuchtegradient nicht verändert wird, sollte der Bohrkern weder feucht gelagert noch gewässert werden.

Der Bohrkern wird dann soweit stückchenweise ausgewertet, wie die Holzstrahlen noch weitgehend parallel zur Bohrachse liegen, d. h. die Bohrkernachse steht normal auf den Jahrringbögen (Abb. 18). Abbildung 19 verdeutlicht, was nicht-radiales Bohren für Auswirkungen auf die Holzstrahlrichtung im Bohrkern hat.

5.3.3. Messen mit dem Resistographen

Ergänzend zu den Fractometeruntersuchungen wurden an ausgewählten Bäumen zusätzlich Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Resistographen-M300-Messungen sollen nachfolgend mit den durch die Fractometermessung erhaltenen Werten verglichen werden. Beide Geräte wurden deshalb am gleichen Baumabschnitt eingesetzt. Dazu wird zunächst nach Tabelle 1 das erforderliche Getriebe ausgewählt und montiert. Die Bohrnadel wird auf ausreichende Schärfe und Fehlerfreiheit überprüft und falls erforderlich ausgewechselt. Damit ein Vergleich der Bohrwiderstandskurve mit den Fractometerdaten überhaupt möglich wird, muß auch mit dem Resistographen senkrecht zur Oberfläche des Baumes radial auf das Mark zu (also in Richtung der Holzstrahlen) gebohrt werden. Die Bohrungen werden dabei in der gleichen Ebene eingebracht, in der bereits die Bohrlöcher der Fractometermessungen liegen. Es wird jeweils eine Resistographenbohrung zwischen zwei Zuwachsbohrkanäle gebohrt.

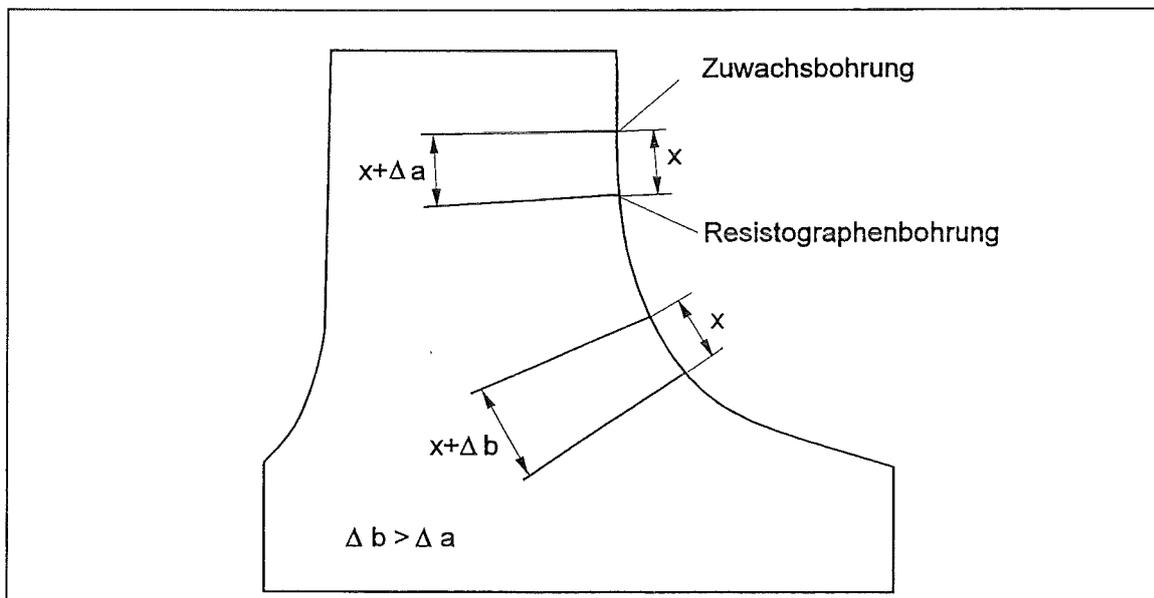


Abbildung 20: Der Abstand zwischen Zuwachsbohrung und Resistographenbohrung wird mit zunehmendem Bohrweg immer größer. Mit stärker werdender Krümmung verstärkt sich dieser Effekt.

Der Weg, den die Bohrnadel dabei beschreibt, ist somit zwischen 15 und 25 mm von einer Zuwachsbohrung entfernt. Dieser axiale Abstand vergrößert sich mit zunehmender

Bohrtiefe zusehends, bedingt durch den Winkel, den die zwei Bohrkanäle aufspannen. Dieser Winkel ist um so kleiner, desto geringer die Krümmung der Baumoberfläche ist (siehe Abb. 20).

Die Resistographenbohrungen sollten nicht zu nahe an ein Fractometerbohrloch gesetzt werden, damit die Bohrnadel nicht durch Holzbereiche bohrt, die durch die Zuwachsbohrung vorgeschädigt sind. Durch den Zuwachsbohrer können in der Bohrlochumgebung Gefäße durch Quetschung und Kompression kollabieren oder Längsrisse eingebracht werden. Gerät die Bohrnadel der Resistographen in solch einen geschädigten Bereich, erhält man einen anderen Bohrwiderstand als dies im ungeschädigten Bereich der Fall gewesen wäre. Es muß also zuverlässig verhindert werden, daß die Bohrnadel auf ihrem Weg durch den Stamm in solch einen vorgeschädigten Bereich gerät und die Meßwerte somit verfälscht werden. Während der gesamten Messung darf das Gerät nicht verkantet werden. Dies würde die Reibung der Bohrnadel erhöhen, was einen höheren Ausschlag des Schreibers zur Folge hätte.

5.3.4. Vergleich von Fractometer und Resistograph

Der entscheidende Unterschied zwischen Fractometer und Resistograph-M300 ist die Tatsache, daß man mit dem Fractometer die radiale Biegefestigkeit (Bohrung in Richtung der Holzstrahlen vorausgesetzt) direkt mißt, über den Resistographen- Meßschrieb aber nur eine Hilfsgröße ermittelt, den sog. Bohrwiderstand. Da eine exakte Korrelation von Bohrwiderstand und Festigkeit oder einer anderen Größe, die in eindeutiger Weise mit der Festigkeit in Beziehung steht, bisher nicht angebar ist, kann eine geeignete Umrechnung der Resistographenwerte nicht erfolgen.

Der Weg, den die Bohrnadel durch das Holz nimmt, ist keineswegs immer geradlinig. Die flexible Bohrnadel kann abgelenkt werden. Erfährt die Nadelspitze einen einseitig höheren Widerstand oder Jahresringe werden nicht senkrecht getroffen und eine Seite der Nadel zerspannt noch im Spätholz, die andere aber schon im Frühholz des nächsten Jahrringes, kann es zu solch einer Ablenkung kommen. Wird ein Bereich höherer Dichte (Jahringgrenze, Ast etc.) nicht senkrecht getroffen, wird die Nadel abgelenkt. Sie nimmt in solch einem Fall den "leichteren" Weg. Die Bohrnadel beschreibt dann übertrieben ausgedrückt einen Kreisbogen mit mehr oder weniger großem Radius.

Hohe Rohdichte erhöht den Druck auf die Nadelspitze, worauf die Durchbiegung der Nadel im Bohrkanal und damit die Reibung zwischen Nadelschaft und Bohrwand erhöht wird. Auch kann hierdurch eine leichte Schrägstellung der Nadelspitze verursacht werden. Außerdem ist bei dichten Holzarten die zu verdichtende Bohrmehlmenge größer als bei weniger dichten Arten. Diese Beobachtungen konnten auch von ECKSTEIN & SAß (1994) bestätigt werden. Da eine Kontrolle über den Krümmungsgrad der Nadel völlig fehlt, kann dies von außen nicht nachvollzogen werden. Der wesentlich steifere Zuwachsbohrer behält hingegen seinen einmal eingeschlagenen Weg bei, und dieser ist auch im Nachhinein noch nachvollziehbar. Entnimmt man den Bohrkern aus dem Zuwachsbohrer, so *erzählt* dieser unmittelbar, welchen Weg der Bohrer durch den Stamm genommen hat. Die visuelle Kontrolle gibt sofort Aufschluß darüber, ob auch tatsächlich entlang den Holzstrahlen gebohrt wurde, die Bohrrichtung also senkrecht zu den Jahres-

ringen liegt. Diese optische Begutachtung des Bohrkernes erweist sich immer dann als nicht zu unterschätzender Vorteil, wenn der Baum in seinem Innern etwas verbirgt, was von außen nicht oder nur schwer sichtbar ist. Hierzu zählen tote, eingeschlossene und überwucherte Äste, früherer Drehwuchs oder alte, überwallte Verletzungen. In all diesen Fällen beschert das Axiom der konstanten Spannung dem Betrachter eine weitgehend glatte und wohlgeformte Oberfläche und täuscht über so manches aus der Baumjugend hinweg. Trifft die Bohrnadel des Resistographen z. B. auf einen alten bereits überwucherten Ast im Stamminnern, so registriert der Schreiber an dieser Stelle sofort einen erhöhten Bohrwiderstand, der aufgrund der Unkenntnis seiner wahren Ursache, leicht zu einer falschen Interpretation führen kann.

Wie bereits erwähnt, kommt es mit zunehmender Bohrtiefe zu erhöhter Reibung des Bohrnadelschaftes im Bohrloch. Ebenfalls erhöht sich der Bohrwiderstand bei hängenden Bäumen auf deren Druckseite schon alleine dadurch, daß das Holz auf dieser Seite unter hohem axialen Druck steht. Dieser vergrößert nicht nur die Schaftreibung, sondern erschwert auch das Drehen des Bohrnadelkopfes. Die aufgezeichnete Bohrwiderstandskurve hängt in diesem Fall überproportional von Kopf- und Schaftreibung ab. Dies wiegt um so schwerer, je größer die Neigung des Baumes aus der Senkrechten ist.

Ist der Stammdurchmesser im Untersuchungsbereich größer als die maximale Bohrtiefe des Resistographen, kann nicht durchgebohrt werden, um durch diesen Trick den Anteil der Schaftreibung am Ausschlag der Aufzeichnungsnadel bzw. Bohrwiderstands zu ermitteln (Umkehrbohrung).

Der Vorteil des Resistographen-M300 gegenüber dem Fractometer liegt in der lückenlosen, analogen Aufzeichnung des Bohrwiderstandes. Jedem Punkt entlang des Bohrweges kann somit genau ein Wert zugeordnet werden. Mit dem auf der Zuwachsbohrung basierenden Fractometer ist dies exakt nur an den tatsächlichen Bruchstellen des Bohrkernes möglich. Der Bohrkern kann jeweils frühestens alle 11 - 12 mm gebrochen werden; die Festigkeitswerte dazwischen bleiben unbekannt. Bruchfestigkeitswerte zwischen den jeweiligen Bruchstellen können nicht ermittelt werden. Ein eventuell höherer Festigkeitswert, der sich zwischen zwei Bruchstellen befindet, bleibt verborgen.

Die Bohrlöcher, die der Resistograph hinterläßt, haben 3 mm Durchmesser und beeinflussen die nächste Umgebung nicht durch Quetschung oder Ähnliches. Die Bohrungen können dadurch in wesentlich engeren Abständen zueinander gesetzt werden als dies mit dem Zuwachsbohrer sinnvoll und zulässig wäre. Mit einem Resistographen ließen sich somit entlang der Stammachse eine größere Anzahl von Radialbohrungen vornehmen.

Der bereits erwähnte Umstand, mit dem Fractometer die tatsächlichen Querbiegefestigkeiten messen zu können und die optische Kontrollmöglichkeit des Probenmaterials machen den Fractometer zum geeigneten Meßgerät für die in Kap 6.2 und 6.5 vorgestellten Studien.

In Abbildung 21 werden beispielhaft einige Fractometerdaten und Resistographenmessungen zum Vergleich übereinander dargestellt. Die Bohrungen des Resistographen lagen ca. 1,5 bis 2 cm oberhalb des jeweiligen Zuwachsbohrloches. Die Meßwerte der beiden oberen Kurvenpaare entstammen aus Buchen, die Werte für das untere Kurvenpaar aus einer Kastanie.

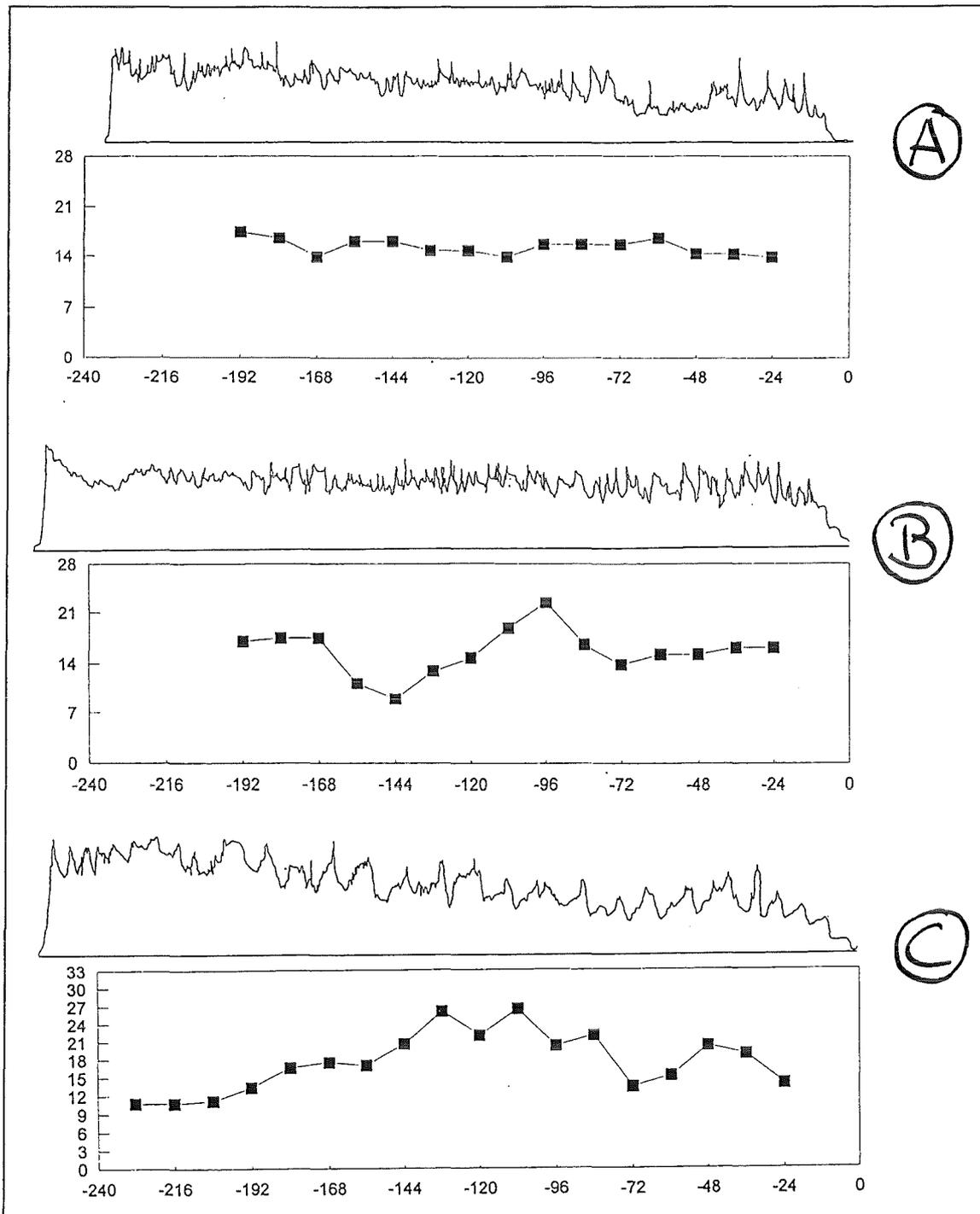


Abbildung 21: Vergleich von Fractometerwerten mit Bohrwiderstandsprofilen des Resistographen-M300. (Ordinate: radiale Biegebruchfestigkeit in MPa, Abszisse: Bohrtiefe in mm)

Ein Vergleich der Fractometer- und Resistographkurven zeigt hier keine deutliche Korrelation der einzelnen Werte untereinander. Gelegentlich findet sich jedoch ein gleicher Trend der Kurven, d. h.: steigt die Bohrwiderstandskurve an, so lassen sich auch in diesem Bereich erhöhte Fractometerwerte feststellen (vgl. hierzu Abb. 21 A).

In gleichem Maße lassen sich aber auch Kurvenpaare finden, in denen das Resistographenprofil ansteigt, die Fractometerwerte im gleichen Bereich jedoch fallen. Der umge-

kehrte Fall (ansteigende Fractometerwerte und deutlich fallende Resistographenwerte) konnte bei keinem, der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bäumen beobachtet werden. Abbildung 21 C zeigt einen stark variierenden Verlauf der Fractometerwerte aber ein gleichförmiges Bohrwiderstandsprofil für den gleichen Stammabschnitt.

RINN (1989, 1991 und 1992) und GÖRLACHER & HÄTTICH (1994) behaupten, einen Zusammenhang zwischen Rohdichte und dem durch den Resistographen gemessenen Bohrwiderstand herstellen zu können. Zusammen mit der von KOLLMANN (1951) gefundenen Raumdichte-Festigkeit-Korrelation läßt sich daraus eine Bohrwiderstand-Festigkeit-Abhängigkeit vermuten. Die in Abbildung 21 dargestellten Ergebnisse lassen diesen Schluß jedoch nicht zu. Sie zeigen, daß der mit dem Resistograph-M300 gemessene Bohrwiderstand nicht streng mit der radialen Biegefestigkeit korreliert ist. Es ist nicht auszuschließen, daß in die Bohrwiderstandskurve weitere Holzgrößen (z. B. Bruchenergie) mit eingehen, die nicht direkt mit der radialen Biegebruchfestigkeit des Holzes gekoppelt sind.

Die Fragestellung welche Größen und Holzeigenschaften mit dem Bohrwiderstand in grünen Hölzern in Verbindung stehen ist derzeit Gegenstand von Untersuchungen im Forschungszentrum Karlsruhe.

5.4. Darstellung der radialen Biegefestigkeitswerte

Nachdem alle Bohrkern aus dem Untersuchungsbereich entnommen und mit dem Fractometer gebrochen wurden, werden die Eintrittsstellen der Bohrlöcher markiert. Im Anschluß daran wird eine Photographie der Seitenansicht des Baumes angefertigt. Die Blickrichtung ist dabei senkrecht auf die Ebene gerichtet, aus der die Bohrkern entnommen wurden. Von dieser Seitenansicht wird die Außenkontur des untersuchten Baumabschnitts punktweise in ein karthesisches Koordinatensystem übertragen und ein FE-Modell für diesen Bereich erstellt.

Der Startpunkt sowie die Bohrrichtung (senkrecht zur Baumoberfläche) für jeden Bohrkern ist bekannt, ebenfalls die Länge jedes einzelnen Bruchstückes und somit die Koordinaten für die jeweiligen Meßpunkte und ihre Fractometerwerte. Der Ort jedes Fractometerbruches ist also mittels Geometriekoordinaten exakt angebbbar.

Das FE-Netz, das die Außenkontur ausfüllt, unterscheidet sich von üblichen FE-Netzen durch folgende Besonderheit: im Untersuchungsbereich werden die Elemente derart gestaltet, daß deren Eckknoten durch entsprechende Koordinatenwahl auf einen Bruchort zu liegen kommen. Mit anderen Worten: die Knoten des FE-Netzes repräsentieren im Untersuchungsbereich diejenigen Orte, an denen die Bohrkern gebrochen wurden. Abbildung 21 verdeutlicht dies anhand einer Skizze.

Mit einem kommerziellen FE-Darstellungsprogramm (FEMVIEW 1991) werden die Geometriedaten des Modells eingelesen, sowie die Fractometerwerte, die den entsprechenden Knoten zugeordnet wurden. Dabei werden alle Knoten, die nicht explizit mit einem Fractometerwert belegt sind, automatisch mit der Wertzuweisung Null eingelesen. Mit den Knoten als Stützstellen interpoliert das Programm zwischen den Knoten linear. Es wird also unterstellt, daß die Änderung der Biegebruchfestigkeiten auf der Strecke von

Bruchstelle zu Bruchstelle sowie von Bohrkern zu Bohrkern durch eine Gerade genügend genau beschrieben wird. Dies ermöglicht dann eine Isolinien- oder, wie im folgenden verwendet, eine Isoflächendarstellung der Meßwerte, obwohl nur an ganz bestimmten Stellen tatsächlich Meßdaten vorliegen. Die Isoflächendarstellung darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß die dargestellten Werte nur an den Knoten exakt bekannt sind, die Werte dazwischen aber durch lineare Interpolation ermittelt worden sind.

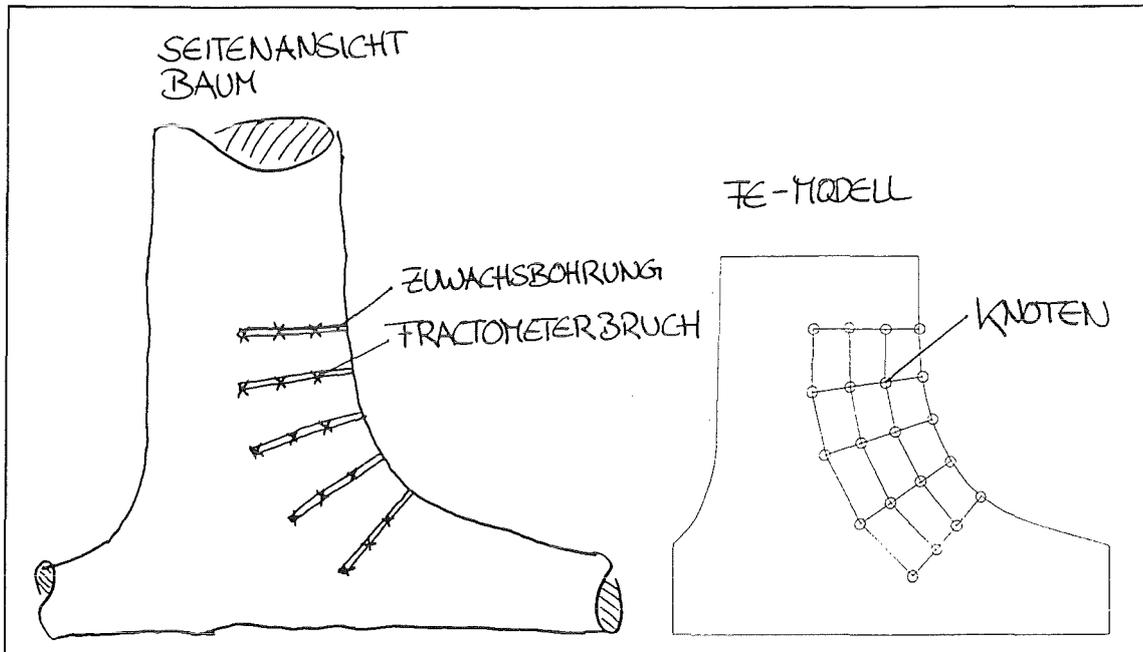


Abbildung 22: Die Koordinaten der Fractometerbruchstellen der Bohrproben werden zum Erstellen der Festigkeitsverteilung in das FE-Modell übertragen.

Die Anzahl der Meßwerte (Fractometerbrüche) pro Festigkeitsverteilung war grundsätzlich von der Größe der untersuchten Struktur abhängig und bewegte sich zwischen ca. 190 für kleine bis ca. 580 Meßpunkten bei großen Strukturen.

5.5. Spannungsberechnung der Baummodelle

Grundlage und Ausgangsbasis für das FE-Modell zur Spannungsberechnung ist die gleiche Außenkontur wie sie schon bei der Meßwertedarstellung Verwendung fand. Da dieses Modell jetzt zur Spannungsanalyse und das CAIO-Verfahren verwendet werden soll, sind an das Netz- Design völlig andere Anforderungen zu stellen. Die Berechnungsalgorithmen der CAIO-Methode sind für Viereckelemente ausgelegt. Deren Zuverlässigkeit und Genauigkeit steigt in dem Maße an, wie sie sich einer quadratischen Form annähern. Die Mittelung der Spannungswerte von den jeweiligen Integrationspunkten auf den Elementschwerpunkt hat zur Folge, daß pro Element auch nur ein einziger Spannungswert akzeptiert wird. In der Darstellung wird, bedingt durch diese Berechnungsweise, der gesamten Elementfläche dieser ein Wert zugewiesen und dargestellt. Eventuell existierende Spannungsgradienten über die Fläche eines Elementes können in diesem Fall nicht berücksichtigt werden. Dies erfordert im allgemeinen eine feinere Diskretisierung als dies für ähnliche Probleme der Spannungsanalyse normalerweise der Fall ist. Die kleinsten Elemente, sind in jenem Bereich zu plazieren, in dem hohe Spannungsgradienten zu er-

warten sind. Im Falle der Betrachtungen hier sind dies die Bereiche der größten Krümmungen.

Für ein Element kann immer nur eine einzige Materialorientierung gelten. Diese wird mittels CAIO aus dem Spannungszustand berechnet, der sich für den Elementschwerpunkt ergibt. Dabei gibt die Richtung der größten Hauptnormalenspannung aus der xy -Ebene die Richtung für den höchsten E-Modul vor und senkrecht hierzu entsprechend die Richtung für den kleineren E-Modul.

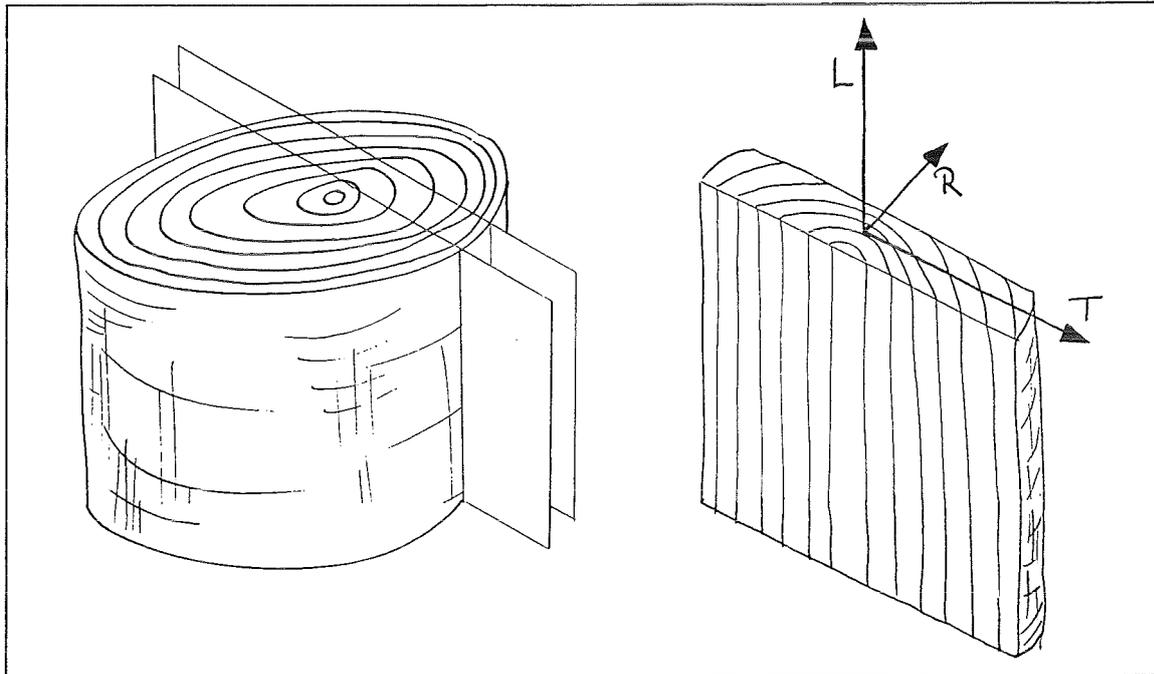


Abbildung 23: Skizze zur Lage des Koordinatensystems, auf welches sich die Angaben zu den Materialeigenschaften von Holz beziehen.

Angaben zum E-Modul parallel zur Holzfaserrichtung von verschiedenen Hölzern sind in der Literatur recht umfangreich und häufig dokumentiert. Die Werte senkrecht zur Längsfaserrichtung sind schon wesentlich seltener angegeben, auch streuen diese Werte erheblich. Dies ist nicht zuletzt auf den Umstand zurückzuführen, daß hierbei nur unvollständig Angaben darüber gemacht werden, ob es sich dabei um die tangentiale oder radiale Richtung handelt. Sind in radialer Richtung noch Holzstrahlen vorhanden, so finden sich in tangentialer Richtung keinerlei Fasern im Holz. Alleine diese Tatsache erfordert eine genaue Angabe, ob der E-Modul senkrecht zur Längsfaserrichtung in tangentialer oder radialer Richtung ermittelt wurde. Meist beschränken sich die gemachten Angaben auf ofentrockenes Holz mit einer Restfeuchte von ca. 12%. Die Materialeigenschaften von Holz sind unter anderem eine Funktion der Holzfeuchte, was diese Daten für eine Simulationsrechnung für grüne, lebende Bäume ungeeignet machen. Von LAVERS (1983) und vom DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1982) sind für eine große Anzahl von Laub- und Nadelhölzern die E-Moduln längs und radial für ofentrockenes wie auch grünes Holz angegeben. Zusätzlich werden die Schubmoduln in Abhängigkeit des Längs-E-Moduls und sämtliche Querkontraktionszahlen für verschiedene Baumarten angegeben. Die erforderlichen Materialdaten für den FE-Input wurden hieraus entnommen bzw. berechnet. Hierbei wurden die in Tabelle 2 angegebenen Beziehungen verwendet.

Baumart	Verhältnis der E-Moduln		Verhältnis von Schubmodul und E-Modul			Poisson Zahl		
	E_T/E_L	E_R/E_L	G_{LR}/E_L	G_{LT}/E_L	G_{RT}/E_L	μ_{LR}	μ_{LT}	μ_{RT}
Laubbäume	0,05	0,1	0,08	0,065	0,018	0,4	0,5	0,7
Nadelbäume	0,05	0,07	0,064	0,07	0,005	0,3	0,5	0,4

Tabelle 2: Materialkennwerte bezogen auf den Längs-E-Modul sowie Querkontraktionszahlen für die FE-Berechnung der Baummodelle (es handelt sich jeweils um den Mittelwert nach DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1982)).

Zur Reduzierung des Momentengradienten bei Querkraftbiegung wird die Last bzw. die Zwangsverschiebung im Kronenschwerpunkt mit Hilfe von sog. *Beam*-Elementen (HIBBIT *et al.* 1987) in die Struktur eingeleitet. Bei einigen Modellierungen wird auch die Ausleitung und Fixierung im Erdreich (Wurzelsimulation) über *Beam*-Elemente gestaltet. Die Stabelemente besitzen an den Verbindungsstellen mit dem fein diskretisierten Untersuchungsbereich die gleichen Biegeeigenschaften wie das Modell und werden nach oben hin allmählich schmaler bzw., falls eingesetzt, nach unten breiter¹⁷. Mit diesen Elementen gelingt es, die Momenteneinleitung und die Momentenausleitung im diskretisierten Stammbereich realistischer zu gestalten, ohne den Baum in seiner gesamten Größe diskretisieren zu müssen. Die Stammhöhe (bis zum Kronenschwerpunkt) wurde geschätzt. Die Wurzelsimulation, d. h. die Fixierung des Modells gegen Translation, wird mittels ein- und zweiwertigen Lagern realisiert. Um einen Eindruck der geometrischen Verhältnisse des Wurzelsystems zu erhalten, wurde dieses an den untersuchten Bäumen so weit wie nötig ausgegraben. Die vorgefundene Situation wurde entsprechend nachmodelliert.

Die besondere Anbindung der *Beam*-Elemente an die Struktur sowie der Umstand, sie nur isotrop modellieren zu können, führten an der Einleitungsstelle vereinzelt zu Spannungsspitzen. Auch die rigide Art der Lagerung führt in den meisten Fällen an diesen Stellen zu Spannungskonzentrationen. Diese klingen aber schon nach wenigen Elementen vollständig ab und haben auf die Spannungsverläufe im Untersuchungsbereich nur untergeordnete Auswirkungen.

Nach MATTHECK & BRELOER (1993) und auch MAYER (1989) ist es nahezu unmöglich, eine Windlastabschätzung für einen Baum zu geben. Aus diesem Grund wird die Belastung des FE- Modells durch eine Zwangsverschiebung des obersten *Beam*-Knotens erreicht. Bewegt sich diese Verschiebung im linear elastischen Bereich, so hat sie lediglich Einfluß auf die Höhe der Nettospannungen, nicht aber auf das Verhältnis der Spannungen untereinander. Da nur die Spannungsverteilungen einer Betrachtung unterzogen wurden, spielten die Absolutwerte keine Rolle. Die Spannungsverteilung, die sich aufgrund der Verschiebung einstellen wird, ist dann von der tatsächlichen Verschiebungs-

¹⁷ Die Geometrien der *Beams* wurden so gewählt, daß sie näherungsweise der Funktion $d \sim h^3$ folgen (MATTHECK 1992a). Der zugehörige Proportionalitätsfaktor wird auf der Basis von Durchmesser- messungen für jeden Baum individuell berechnet.

größe unabhängig. Die Verschiebung des oberen *Beam*-Knotens in Hauptwindrichtung lag im Bereich von 1 - 2% der gesamten Strukturhöhe.

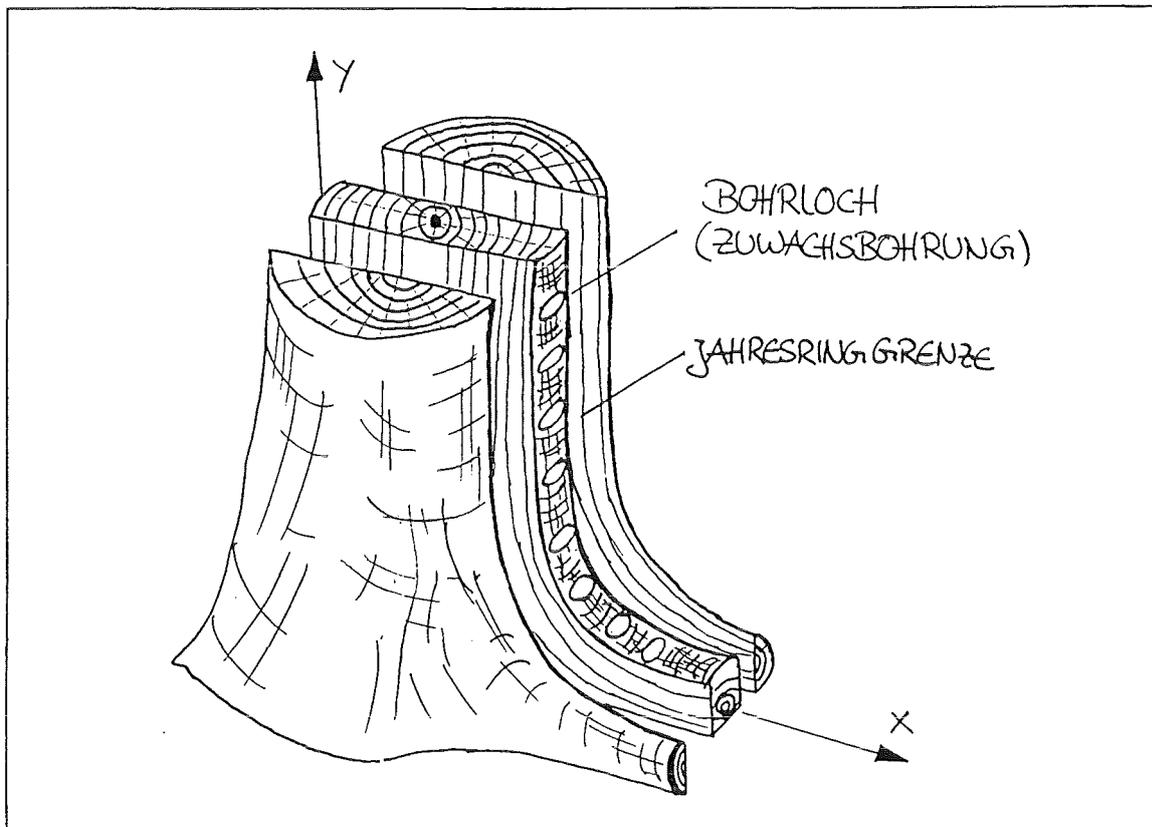


Abbildung 24: Skizze der betrachteten Bauebene am Beispiel eines Wurzelanlaufes.

Abbildung 24 veranschaulicht anhand einer Skizze den sowohl für die Festigkeits- als auch Spannungsbetrachtungen ausgewählten Baubereich. Die betrachtete Ebene stammt aus dem Innern der Struktur und deren Ausdehnung normal zur xy -Ebene ist gegenüber dem realen Radius sehr gering. Bedingt durch die Beschränkung auf eine nur zweidimensionale Modellierung konnten Belastungen, die nicht in der xy -Ebene liegen, nicht berücksichtigt werden, wie z. B. Torsion des Stammes durch einseitige Windbelastung der Krone. Die FE-Modellierung der in Kapitel 6.2 betrachteten Bäume wurde mit Vierpunktknoten-Elementen für den ebenen Verzerrungszustand realisiert.

Bäume, deren Stamm aus der Richtung der Erdanziehungskraft geneigt war, wurden über die Funktion Eigengewicht belastet. Hierzu wurde dem gesamten Modell eine Dichte > 0 gegeben. Da ausschließlich im linear elastischen Bereich gerechnet wurde, stellen sich die für Eigengewichtsbelastung typischen Verschiebungen und somit Spannungsverteilungen ein. Wie schon bei der Zwangsverschiebung hat hierbei die Höhe des Eigengewichts nur Einfluß auf die Nettospannung, jedoch nicht auf die Spannungsverteilung. Bei geraden und gekrümmten Stämmen mit dem Kronenschwerpunkt über dem Wurzelzentrum wurde auf die Belastung durch Eigengewicht in Verbindung mit Querkraftbiegung bewußt verzichtet. Bei einer Kombination von Biegebelastung und Eigengewicht kommt es auf das richtige Verhältnis der beiden Belastungsgrößen an, solange sie nicht in die gleiche Richtung wirken. Das Stamm- und Kronengewicht kann mit vertretbarem Aufwand aber nur unvollständig und äußerst ungenau bestimmt werden. Das

Verhältnis aus Verschiebung und Eigengewicht wäre also reine Spekulation und außerdem ist bekannt, daß die Gewichtsbelastung gerader Bäume gering im Vergleich mit deren Windbelastung ist.

6. Ergebnisse

6.1. Der gekrümmte Biegeträger

Welches erhöhte Versagensrisiko gekrümmte Träger bzw. Baumteile, die eine Kraftflußumlenkung erzwingen, in sich bergen, wurde in Kapitel 4 bereits qualitativ an zwei typischen Baumgeometrien (gekrümmter Ast bzw. Stamm und Wurzelanlauf) erläutert. Für dieses Risiko sind Spannungen senkrecht zum Holzfaserverlauf verantwortlich.

BETHGE *et. al* (1992) geben einen Überblick über die gebräuchlichsten, analytischen Lösungsansätze zur Radialspannungsberechnung in gekrümmten Biegeträgern. Es wird gezeigt, daß die Radialspannungen (σ_r) für alle Lösungsansätze ihren maximalen Wert zwischen dem Innenradius (R_i) und dem mittleren Radius (R_m) des Biegebalkens annehmen.

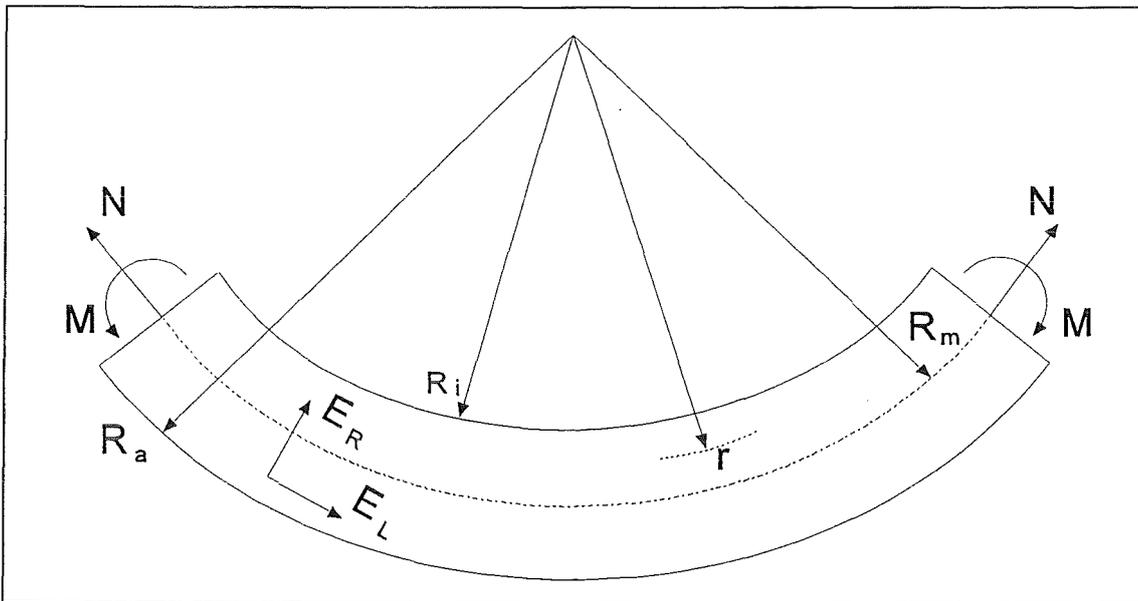


Abbildung 25: Biegebalkengeometrie, die für die numerischen, und analytischen Berechnungen sowie die CAIO-Methode (Kap. 5.1.2.) verwendet wurde.

Die allgemeinen Berechnungsvorschriften nach FOSCHI (1968) und NOACK & ROTH (1972) für σ_r in einem gekrümmten Biegeträger erlauben eine Analyse des Problems auch für zylindrisch, anisotrope Materialien. Sie sind zulässig für die Berechnung unter Momenten- und Normalkraftbelastung in der Krümmungsebene. Orthotropes Materialverhalten, wie es von Holz im allgemeinen gezeigt wird, kann somit in die Berechnungen mit einfließen.

Für eine gegebene Biegeträgergeometrie, wie sie in Abbildung 25 dargestellt ist, sind unter Vernachlässigung der Normalkräfte und einem festen E-Modulverhältnis von radialem Wert zu dem in Umfangsrichtung, die Lösungen von FOSCHI (1968) und NOACK & ROTH (1972) identisch mit denen nach NORRIS (1963). Nach NORRIS ergibt sich die Radialspannung (σ_r) zu:

$$\sigma_r(r) = M(C_1 m_1 r^{m_1 - 2} + C_2 m_2 r^{m_2 - 2} + C_3 m_3 r^{m_3 - 2})$$

C_1 , C_2 , C_3 , m_1 , m_2 und m_3 werden aus den E-Modul- und Geometrieverhältnissen des gekrümmten Biegeträgers errechnet (NORRIS 1963). Somit ist bei gegebener Geometrie und festem Verhältnis der Elastizitätsmoduli der Betrag von σ_r nur noch abhängig von der Laufvariablen r . Als Verhältnis aus E-Modul radial (E_R) und E-Modul in Längsrichtung (E_L) wurde $0,09^{18}$ gewählt.

Der gesamte Verlauf von σ_r über den Radius r des Biegeträgers ist in Abbildung 26 gegeben. Hierin sind auch die Graphen für die im folgenden besprochenen FE-Spannungsanalysen zum Vergleich eingetragen.

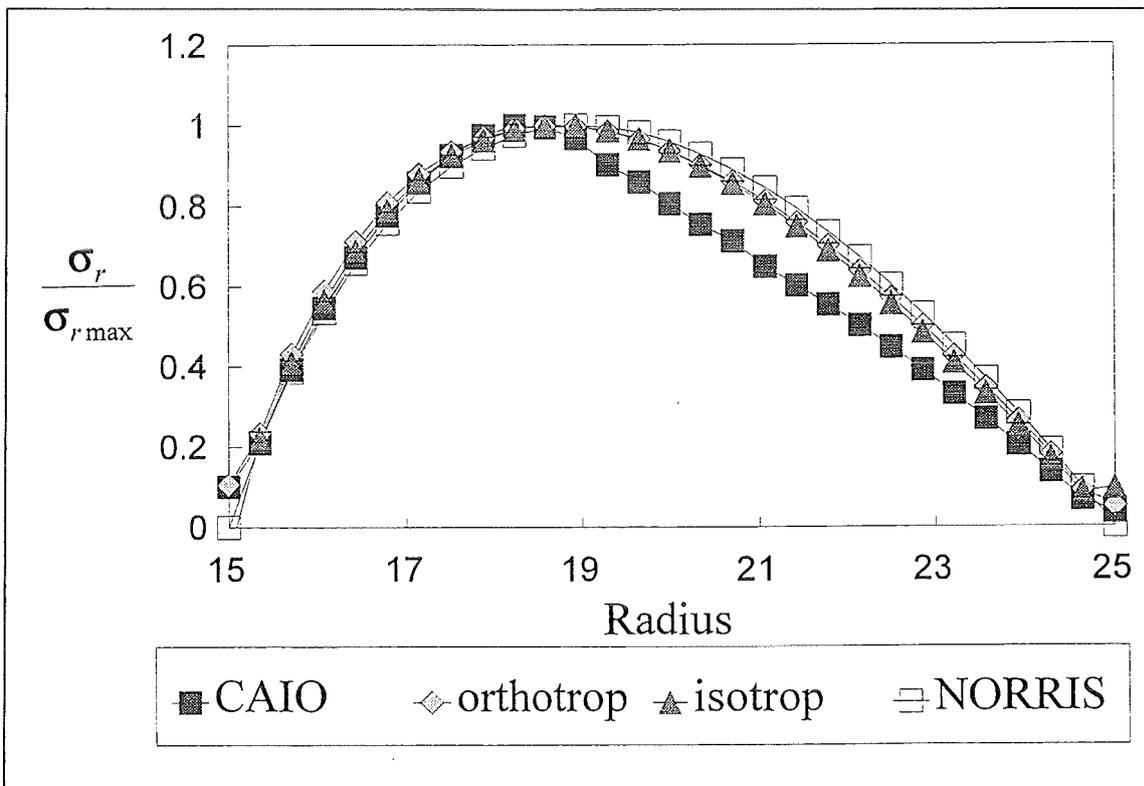


Abbildung 26: Vergleich der berechneten Radialzugspannungsverläufe über dem Biegeträger-radius ($R_i=15$, $R_a=25$).

Es fällt zunächst auf, daß trotz symmetrischer Momentenbelastung und Querschnittsform σ_r nicht symmetrisch verteilt ist, sondern das Maximum sich auf der Zugseite der Biegung befindet, was eine Folge der krümmungsbedingten Kraftflußumlenkung ist. Dort würde bei einer homogenen Festigkeitsverteilung die Delamination zunächst starten.

Die zweidimensionalen FE-Modelle entsprachen in ihren geometrischen Abmessungen und ihrer Belastung dem Biegeträger, der auch der analytischen Berechnung zugrunde lag.

¹⁸ $E_R/E_L=0,0895$ ist der Mittelwert aus den E-Modulverhältnissen radial zu longitudinal von Birke, Fichte, Pappel, schwarzer Walnuß und Sweetgum (DEPARTMENT OF AGRICULTURE 1982).

Die FE-Analyse wurde für den gekrümmten Träger jeweils für isotropes Material, für zylindrisch anisotropes Material und mit dem CAIO-Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse für σ_r sind in Abb. 26 auf den jeweils maximalen σ_r -Wert ($\sigma_{r, \max}$) normiert und über der Laufvariablen r vom Innenradius R_i ausgehend zum Außenradius R_a aufgetragen. Die Radialspannungsverteilung der Isotropen-, Orthotropen- und der CAIO-Berechnung unterscheiden sich kaum von der analytisch gewonnenen Lösung nach NORRIS (1963). Für alle drei Modellierungen fällt das σ_r -Maximum mit dem analytisch ermittelten Ort zusammen. Der σ_r -Kurvenverlauf, der durch CAIO erhaltenen Materialorientierung, fällt nach Erreichen von $\sigma_{r, \max}$ stärker ab und zeigt von dort an einen etwas flacheren Kurvenverlauf als die anderen Lösungen.

Obwohl der Biegebalken nicht durch Innendruck beaufschlagt war, sind die Radialspannungen der drei FEM-Lösungen auf dem Innen- und Außenradius nicht exakt Null. Dies ist ein Phänomen, welches auf die Diskretisierung des Biegebalkens zurückzuführen ist. Die Außenkontur des gekrümmten Trägers kann lediglich durch endlich kleine Geradenstücke (Elementkanten) approximiert werden, was zwangsläufig zu einer Querspannungskomponente führt.

Für die geometrisch einfache Form eines gekrümmten Biegebalkens (Abb. 25) unterscheidet sich der Ort von $\sigma_{r, \max}$ für orthotropes wie auch isotropes Materialverhalten nicht. Da jedoch bislang kein Nachweis erbracht worden ist, daß dies allgemeingültig für alle Geometrien gilt, kann bei der Spannungsanalyse von orthotropen Materialien auf eine Simulationsrechnung mit ebenfalls orthotropen Materialeigenschaften nur bedingt verzichtet werden.

Den voranstehenden, theoretischen Betrachtungen über den gekrümmten Biegeträger lagen neben isotropem Material auch eine orthotrope E-Modulverteilung zugrunde. Hierbei war der E-Modul in axialer Richtung um der Faktor 11,2 größer als der in radialer Richtung. Über Festigkeiten und Versagen wurde dabei noch nicht gesprochen. Unterstellt man dem Biegebalken eine der E-Modulverteilung ähnliche Festigkeitsverteilung, d. h. die Festigkeiten sind in radialer bzw. axialer Richtung jeweils konstant, unterscheiden sich in ihrer Höhe aber erheblich voneinander, wird sofort klar, was eine inhomogene Spannungsverteilung für dieses Bauteil bedeutet. Genau an derjenigen Stelle, an der $\sigma_{r, \max}$ auftritt, werden die Materialfestigkeiten wesentlich früher überschritten als an anderen Stellen im Bauteil. Das Material würde an dieser Stelle getrennt werden. Das Faserbündel delaminiert. Ist in einem gekrümmten Ast oder Wurzelanlauf solch ein Riß entstanden, wird allein durch die Anwesenheit dieses Risses die vormals weitgehend schubspannungsfreie Faserorientierung durch das plötzliche Auftreten von Schubspannungen empfindlich gestört. Der Kraftfluß erfährt aufgrund der durch den Riß neu entstandenen Geometrieverhältnisse eine Umlenkung. In vielen Bereichen des Werkstoffes verläuft der Kraftfluß dann nicht mehr parallel zu der Faserorientierung, was sofort Schubspannungen zwischen den Holzfasern induziert (ALBRECHT *et al.* 1992).

6.2. Vergleich der Festigkeiten mit den Querspannungen

In diesem Kapitel sollen gemessene radiale Biegefestigkeitsverteilungen mit berechneten Querzugspannungsverteilungen in Bäumen verglichen werden.

Ist eine analytische Lösung für den gekrümmten Biegebalken mit konstanten Radien R_i und R_a aus Kap. 6.1 noch relativ einfach zu finden, so ist dies für gekrümmte Stämme, Äste oder Wurzelanläufe auf diesem Wege nicht mehr der Fall. Diese Geometrien beschreiben mit ihren Außenkonturen Kurven, bei denen der konstante Radius nicht auftritt. Auch der phantasievollste Designer stößt bald an seine Grenzen, wenn es darum geht, in solch komplexen Strukturen die Faserverläufe und somit die richtigen Materialorientierungen rein nach Gefühl von Hand modellieren zu müssen. Hierbei ist die CAIO-Methode eine wirkungsvolle Hilfe. Sie richtet sich nach einer Sub-Design-Regel für Bäume: *gestalte die Materialorientierung so, daß Schub zwischen den Fasern vermieden wird.*

Von der Materialorientierung im Bereich der neutralen Faser der Biegung abgesehen, ist das CAIO-Verfahren geeignet für Baumstrukturen (gekrümmte Äste, Stämme und Wurzelanläufe), die realen Materialorientierungen (Faserverlauf) nachzubilden. Die Orientierung der Materialdaten im Bereich der neutralen Faser hat, wie oben gezeigt, keinen wesentlichen Einfluß auf die gesuchte Radialspannungsverteilung.

Im folgenden werden die untersuchten Bäume kurz beschrieben (Lage, Stammdurchmesser etc.) sowie falls erforderlich auf deren Besonderheiten eingegangen. Die daran anschließenden Übersichtstafeln wurden alle nach dem gleichen Grundprinzip aufgebaut und sind weitgehend selbsterklärend. In der oberen Reihe wird links eine Seitenansicht des jeweiligen Baumes gezeigt. Die weißen Pfeile oder Stifte markieren hierbei die Bohrkernentnahmestellen. Die Abbildung rechts davon zeigt das FEM-Netz mit Einspannungen und Randbedingungen für die Spannungsanalyse. In der Reihe darunter ist links die mit dem Fractometer gemessene radiale Biegefestigkeitsverteilung in MPa und rechts davon die berechnete Querspannungsverteilung abgebildet. Letztere ist normiert auf den mittleren Spannungswert im Bereich der oberen Zuwachsbohrung.

Zum direkten Vergleich der gemessenen Querbiegefestigkeitsverteilung mit der berechneten Querspannungsverteilung hat es sich als günstig erwiesen, die Schrittweiten für die Skala der Graustufungen der einzelnen Verteilungen (Tafel 1 bis 31) nicht immer äquidistant auszuwählen.

Die Werte der Buchen 6 bis 9 entstammen der Arbeit von SCHMIDT (1994b).

AHORN 1 (Tafel 1)

Dieser Ahornbaum, nordwestlich von Karlsruhe, wurde wohl in früher Jugend niedergedrückt. Der Stamm begann sich zu bewurzeln. Ca. 63 cm von der früheren Hauptwurzel entfernt, verankert ein kräftiges Wurzelpaar den Ahorn im Boden. Zwischen dem Wurzelpaar vorn und der Hauptwurzel hinten gehen rechts und links insgesamt weitere 5 Wurzeln ab. Der Stamm hat im Bereich der oberen Bohrung einen Durchmesser von 15 cm. Die vielen Wurzelabgänge und deren Verwebung mit den Stammfasern erschwerten das Messen mit dem Fractometer erheblich. Auch die bodennahe Beastung des Stammes und die abgestorbenen und überwallten alten Äste in diesem Bereich führten zu Meßproblemen.

Der Längsfaserverlauf war stellenweise wellig, und die Holzstrahlen verliefen nur selten streng parallel zur Bohrkernachse. Die vielen Äste und Wurzelabgänge bewirkten, daß

auch ein gewisser Anteil von Holzfasern in Bohrkernachsenrichtung zeigte und dadurch dessen Biegefestigkeit erhöhten. Solche Holzproben weichen aber mit ihrer Faserorientierung von den bisher betrachteten stark ab und können deshalb nicht mit diesen verglichen werden. Die Auswertung der Zuwachsbohrungen konnte aus diesem Grund nur partiell durchgeführt werden. Dieser Ahornbaum wurde im Spätsommer gegen Ende der Vegetationsperiode untersucht.

Im Bereich der Wurzelanbindungen wurde der gesamte Querschnitt durchbohrt und die Festigkeitswerte über den ganzen Bereich dargestellt. Im Abschnitt der Krümmung und des senkrechten Stammes werden nur die Fractometerwerte auf der Zugseite der Biegung dargestellt. Trotz der hier schwierigen Situation, durch die vielen Wurzelanbindungen und Äste auch im unteren, erdnahen Stammbereich, ist eine gute Übereinstimmung der Festigkeitsverteilung mit der berechneten Querspannungsverteilung im Krümmungsbereich zu erkennen. Das auf zwei Dimensionen beschränkte Modell und die Unkenntnis der exakten Kraftfluß- und Materialverteilung dieses Ahornbaumes sind die hauptsächlichsten Gründe für die gelegentlichen Abweichungen von FE-Ergebnis und Fractometermessung.

Die radialen Biegefestigkeitswerte der Zuwachsbohrung aus dem Krümmungsbereich liegen im Mittel um den Faktor 1,2 höher als für die Bohrungen durch den astfreien, geraden Stammbereich.

BIRKE 1 (Tafel 2)

Diese Weißbirke wächst in einem steilen Waldstück nordöstlich von Ramberg im Pfälzer Wald. Die Hangneigung beträgt zwischen 50° und 55° . Der Stamm liegt in einer Länge von 175 cm (vom Wurzelstock aus gemessen) auf der Erde auf und ist teilweise bewurzelt. Ein früherer Erdrutsch oder große Schneemassen führten vermutlich zu der vorgefundenen Situation. Die Birke versucht durch Zugholzanlagerung auf ihrer Oberseite, den Stamm wieder weitgehend aufzurichten und ihre Krone zwischen den Nachbarbäumen hindurch zum Licht zu bringen. Die Fractometeruntersuchungen an dieser Birke wurden im Hochsommer durchgeführt.

Der Durchmesser des Stammes beträgt 15 cm (obere Bohrung). Insgesamt wurden 36 Bohrkerne in einem Abstand von ca. 3,5 bis 4 cm aus der Birke entnommen und mit dem Fractometer gebrochen. Die Außenkontur und der kegelige Stammquerschnittsverlauf ergaben bei der Fractometermessung traten mehrere lokale Festigkeitsmaxima auf. Dieses zunächst verblüffende Ergebnis konnte durch die FE-Simulationsrechnung erklärt werden. Das nach der Seitenansicht erstellte FE-Modell wurde nur auf Eigengewicht belastet. Die Querspannungsanalyse ergab an denjenigen Stellen eine Spannungsüberhöhung, an denen zuvor die höchsten Fractometerwerte gemessen wurden. Die Birke erhöhte also nicht grundlos in drei verschiedenen Stammbereichen die radialen Holzfestigkeiten, sondern reagierte vielmehr auf die Belastung durch Querspannungen.

Von der Krone stammabwärts betrachtet ergab sich für das erste lokale Festigkeitsmaximum eine im Mittel 1,08-fache Überhöhung im Vergleich mit den oberen zwei Bohrproben. Für das zweite und dritte lokale Maximum ergaben sich die Faktoren 1,23 bzw. 1,14.

BUCHE 1 (Tafel 3)

Diese Buche wächst nordwestlich von Ramberg auf einem ca 35° geneigten Hang. Der Stammdurchmesser 150 cm über dem Boden beträgt ca. 40 cm. Der Stamm ist gegenüber der Vertikalen um 20° geneigt. Eine kräftige Wurzel verankert die Buche hangseitig. Nach unten sind keine oberflächlichen Wurzelstränge zu erkennen. Eine große Anzahl der Starkäste wachsen in Richtung des Freiraumes, der sich über dem Waldweg unterhalb der Buche befindet. Die Krone ist dadurch stark einseitig und belastet den Baum auf Biegung. Die Fractometermessungen wurden zu Beginn des Sommers durchgeführt.

In der Spannungsberechnung wurde nur eine Eigengewichtsbelastung durchgeführt. Die Querspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf, die sich dabei einstellte, zeigt gute Übereinstimmung mit der gemessenen Festigkeitsverteilung. Es befinden sich genau an den Stellen hohe radiale Biegefestigkeiten im Baum, an denen auch hohe Querspannungen herrschen.

Die mittlere Biegefestigkeit der oberen zwei Bohrkerne beträgt 23,1 MPa, der höchste in diesem Abschnitt gemessene Wert war 27,1 MPa. Die mittlere Festigkeit zweier Bohrproben, die durch das lokale Festigkeitsmaximum verliefen, lag bei 28,4 MPa, was eine Festigkeitssteigerung um den Faktor 1,23 gegenüber den oberen Bohrkerne bedeutet. Der höchste gemessene Fractometerwert in diesen unteren Bohrkerne war 32 MPa.

BUCHE 2 (Tafel 4)

Diese Buche steht nur wenige Meter von der weiter oben besprochenen Birke entfernt. Sie kann sich lediglich hangaufwärts im Erdreich verankern, da sie im vorderen Bereich auf einem Sandsteinplateau aufliegt. Ihr Stammdurchmesser an der oberen Bohrung beträgt 29 cm. Die Messungen fanden im Hochsommer statt.

Ein Vergleich der Querfestigkeiten mit den Querspannungen zeigt kaum Unterschiede zwischen den beiden Verteilungen. Die Holzfestigkeiten sind also genau dort am höchsten, wo auch die größten Belastungen wirken.

Die Querfestigkeiten der oberen zwei Zuwachsbohrkerne ergeben gemittelt 22,1 MPa, die Festigkeiten aus dem Krümmungsbereich hingegen 29,9 MPa, was einer Festigkeitssteigerung von ca. 35% entspricht. Für die jeweiligen Maximalwerte aus den Bohrkernpaaren verhält sich die Festigkeitszunahme ähnlich. Es ergibt sich ein Höchstwert von 26,1 MPa für oben und 34,1 MPa für die Bohrkerne aus dem Krümmungsbereich.

BUCHE 3 (Tafel 5)

Buche 3 hat von allen untersuchten Buchen mit 73 cm den größten Stammdurchmesser (gemessen an der oberen Bohrung). Die Buche steht auf einer Bergkuppe und hat vorwiegend Windbelastung aus Richtung des untersuchten Wurzelanlaufes. Dieser Anlauf birgt also bei starkem Wind die Gefahr der Faserdelamination in sich. Die vier kräftigen Hauptwurzeln stehen im Winkel von ca. 90° zueinander. Die Messungen wurden im Herbst zum Ende der Wachstumsperiode durchgeführt.

Das gute Ergebnis in Übereinstimmung von Festigkeits- und Spannungsverteilung liegt zum einen an der gleichmäßigen und astfreien Holzqualität und dem guten Gesundheits-

zustand der Buche, zum anderen an der realitätsgetreu modellierbaren Lagerungs- und Belastungssituation (symmetrische Wurzelformation, gerader, gesunder Stamm, eindeutige Vorzugswindrichtung).

Die mittlere maximal ertragbare Biegebruchspannung der oberen zwei Zuwachsbohrproben lag bei 25,9 MPa, bei den zwei Bohrkernen aus dem Bereich der größten Krümmung hingegen bei 33,1 MPa. Dies ergibt einen Überhöhungsfaktor von 1,3. Ein Vergleich der gemessenen Maximalwerte aus diesen Bohrkernen zeigt eine Steigerung der radialen Biegebruchfestigkeit von 30,8 MPa (oben) auf 38,6 MPa (unten).

BUCHE 4 (Tafel 6)

Diese mäandrierende Buche steht im Naturpark Pfälzer Wald im Unterholz. Der *S-förmige* Wuchs hat vermutlich phototrope Ursachen. Der Baum ist umgeben von größeren Bäumen, die bei voller Begrünung einen Großteil des einfallenden Sonnenlichtes aufnehmen. Sein Durchmesser beträgt bei der oberen Bohrung 16 cm.

Aufgrund der undifferenzierten Belastung der Buche durch Wind (geschützte Unterholzlage) wurde die Spannungsberechnung für zwei Belastungsrichtungen durchgeführt. In der Darstellung der Spannungsverteilung wurden die Ergebnisse von beiden Belastungszuständen gleichzeitig berücksichtigt. Die Meßwertaufnahme war durch die starke Belastung im Untersuchungsbereich erheblich erschwert. Die gemessene Querfestigkeitsverteilung weicht an einigen Stellen von der errechneten Spannungsverteilung ab. Dies ist im wesentlichen auf die ungleichmäßigen Faserverläufe in den Astbereichen zurückzuführen. SCHMIDT (1994b) konnte an drei Beispielen zeigen, daß Äste, eingewachsene Aststummel und bereits überwallte Wunden, die Fractometerwerte beeinflussen. Trotz der schwierigen Wachstums- und Belastungssituation der Buche sind in weiten Bereichen, Übereinstimmungen in Festigkeits- und Querspannungsverteilung zu erkennen.

BUCHE 5 (Tafel 7)

Buche 5 steht in unmittelbarer Nähe zu einem Waldweg. Im Gegensatz zu den Nachbarbäumen ist dieser Baum eher klein. Die einzige Möglichkeit, genügend Licht aufzunehmen ist, die Krone weit in den freien Raum über dem Weg zu bringen. Die Brettwurzelbildung resultiert aus einer zunächst guten Anbindung an einen früheren Baumstumpf. Dieser verfaulte mit zunehmendem Alter, und die Buche mußte sich stammfern im Boden verankern. Der Buchenstamm hat unterhalb der oberen Bohrung einen Durchmesser von 16 cm.

Die Querfestigkeits- und die Querspannungsverteilung besitzen beide an der gleichen Stelle ein lokales Maximum. Die Holzfestigkeiten senkrecht zum Faserverlauf sind also dort am größten, wo sich auch die höchsten Belastungen quer zur Faser befinden. Als mittlerer Festigkeitswert aus den oberen zwei Bohrkernen ergibt sich 26,2 MPa, für die Bohrproben aus dem Krümmungsbereich 30,4 MPa. Die Maximalwerte steigern sich von 31,7 MPa (oben) auf 34,4 MPa (Krümmung).

BUCHE 6 (Tafel 8)

Diese ca. 40 Jahre alte Buche im Naturpark Pfälzerwald hat einen Stammdurchmesser von 15 cm (obere Bohrung). In früher Jugend konnte sich ein starker Seitenast gegen-

über dem damaligen Wipfeltrieb durchsetzen und übernahm die Führung. Der Preis für diesen *Führungswechsel* ist eine Querspannungsüberhöhung in seinem Stamminnern.

Die Querspannungsverteilung, die für diesen Buchenast berechnet wurde, zeigt deutliche Übereinstimmung mit der zuvor gemessenen Biegefestigkeitsverteilung. Der Baum hat auf die kümmungsbedingte Querspannungserhöhung reagiert und in diesen Bereichen die bestehende Holzqualität (Querbiegefestigkeit) erhöht.

Die Bohrkerne aus dem Bereich der stärksten Krümmung zerbrachen im Mittel bei einer Bruchspannung von 21,6 MPa, die oberen Bohrproben schon bei 17,2 MPa. Dies ergibt einen Festigkeitszuwachs von 26%. Als Maximalwert konnte im oberen Untersuchungsbereich 23,3 MPa, im Gebiet der stärksten Krümmung 29,9 MPa gemessen werden.

BUCHE 7 (Tafel 9)

Diese ca. 50 Jahre alte Buche, mit einem Stammdurchmesser oberhalb der höchsten Bohrung von 23 cm, wurde in ihrer Vergangenheit schiefgestellt. Sie richtete sich durch Rückbiegung ihres Stammes in einem weiten Bogen wieder auf. Der Stamm im oberen Bereich wächst jetzt wieder weitgehend vertikal und gerade.

Die Analyse der Festigkeitsverteilung, die sich aufgrund von 308 Fractometerbrüchen einstellte, ergab zwei deutlich voneinander getrennte lokale Biegefestigkeitsmaxima. Die FE-Simulationrechnung ergab auch für die Querspannungen eine ähnliche Verteilung der Maxima. Die Festigkeiten sind auch in dieser sich zurückbiegenden Buche so verteilt wie die Querspannungen.

Für die oberen zwei Bohrkerne ergab sich eine mittlere Biegefestigkeit von 9 MPa. Die Zuwachsbohrkerne aus dem mittleren bzw. unteren Bereich brachen erst bei einer Zugbelastung im Einspannquerschnitt von 18,4 MPa bzw. 26,1 MPa. Es ergibt sich somit eine Festigkeitserhöhung um den Faktor 2 für den mittleren Abschnitt und 2,9 für den unteren Stammbereich. Die Auswertung der oben betrachteten Bohrkerne im Hinblick auf ihre Maximalwerte ergab 23,2 MPa für oben, 27,1 MPa für die Mitte und 33,4 MPa für die unteren Kerne.

BUCHE 8 (Tafel 10)

Im gleichen Waldabschnitt wie der oben beschriebene Baum steht auch diese mit 25 Jahresringen noch recht junge Buche. Der Stammdurchmesser bei der oberen Bohrung beträgt 14 cm. Sie ist der Baum mit dem geringsten Stammquerschnitt, welcher im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde.

Der Wurzelstock dieser Buche wurde vermutlich in früher Jugend schiefgestellt. Die faltige, an Elefantenhaut erinnernde Rinde auf der Krümmungsinneseite und die straffe, glatte Rindenoberfläche auf der Krümmungsaußenseite zeigen, daß der Baum noch immer bemüht ist, sich zurückzubiegen.

Die Spannungsanalyse offenbart, welche Folgen dieses Wachstum für die inneren Bereiche des Stammes unter Biegebelastung in der gezeigten Weise hat. Eine deutliche Querspannungsüberhöhung im Krümmungsbereich wird sichtbar. Diese läßt sich in drei lokale Maxima aufteilen. Diese Abschnitte des Stammes sind stärker als andere Stammbereiche

auf Querkzug belastet und die Gefahr einer Delamination der Längsfasern ist dort am größten. Die Verteilung der Querfestigkeiten in diesem Buchenstamm verhält sich äquivalent zu der Spannungsverteilung. Der Gefahr einer Längsspaltung begegnet der Baum mit höheren Holzfestigkeiten in denjenigen Bereichen, in denen seine Querbelastrung am höchsten ist.

Die mittlere Biegebruchspannung, bei der die Holzproben mit dem Fractometer gebrochen werden konnten, war für die oberen zwei Bohrkerne 16,6 MPa für die mittleren Zuwachsbohrproben 23,2 MPa, was einer Erhöhung um 40% entspricht. Der höchste Biegebruchwert lag oben bei 22,4 MPa, in der Mitte bei 26,9 MPa.

BUCHE 9 (Tafel 11)

Diese Buche aus dem Süd-Schwarzwald wurde in einem früheren Wachstumsstadium vollständig umgedrückt und konnte sich wieder neu verankern und aufrichten. Der Buchenstamm liegt über einen weiten Bereich auf dem Erdboden auf, ohne sich dort neu bewurzelt zu haben. Diesem Umstand wurde bei der FE-Modellierung durch einwertige Lager (y-Richtung) Rechnung getragen. Die Belastung des Baummodelles wurde über Biegung durch Eigengewicht vorgenommen.

Sowohl die Spannungsverteilung als auch die Festigkeitsverteilung zeigen im oberen und mittleren Stammbereich lokale Maxima. Ein Vergleich der mittleren Bohrkernfestigkeiten der oberen zwei Bohrproben mit den Proben aus dem größten Krümmungsbereich ist in diesem Fall in der gewohnten Weise nicht möglich, da die oberen Zuwachsbohrungen bereits durch eines der gemessenen Festigkeitsmaxima verlaufen.

BUCHEN 10 bis 14 (Tafeln 12 bis 16)

Die Werte für die folgenden fünf Buchen wurden freundlicherweise von Herrn Dietmar Reuschel und Herrn Achim Zipse zur Verfügung gestellt. Die betrachteten Buchen stehen im Naturpark Pfälzer Wald in der Nähe von Ramberg. Sie sind nach SCHÖNENBERGER *et al.* (1994) als Bäume mit Säbel- oder Bogenwuchs einzuordnen. Der instabile und über Jahre hinweg sich bewegende Boden bewirkt eine stetig zunehmende Schiefstellung des Stammes, der Baumwipfel versucht jedoch stets vertikal zu wachsen.

Die Buchenstämme liegen im Durchmesserbereich von 17 bis 22 cm (Stelle der obersten Zuwachsbohrung). Die Stammkrümmungen der fünf Buchen sind unterschiedlich stark. Wobei die Buche 1 die größte Krümmung aufweist bis hin zur Buche 5, mit der schwächsten Krümmung. Die Zuwachsbohrkerne wurden sämtlich im Sommer entnommen und vermessen.

Die radialen Biegefestigkeiten der zwei Bohrungen aus dem Bereich der größten Krümmung im Vergleich zu den zwei obersten Bohrungen lagen im Mittel um den Faktor 1,3 höher. Die Buche 5 zeigte hierbei mit einem Überhöhungsfaktor von nur 1,1 den geringsten und die Buche 1 mit einem Faktor von 1,7 die größte Festigkeitssteigerung in dieser Baumgruppe. Die Höhe der Festigkeitszunahme hängt also vom Krümmungsgrad ab. Je stärker ein Baumteil gekrümmt ist, desto größer ist das Delaminationsrisiko. Der Baum reagiert somit nicht nur auf die prinzipielle Gefahr der Querkzugbelastung mit Erhöhung seiner Materialqualität. Er erhöht auch seine Querfestigkeit angepaßt an die jeweilige Belastungsgröße.

EICHE 1 (Tafel 17)

Diese Eiche wächst in einem kleinen Tal des Flusses Esteron im Südosten Frankreichs. Vermutlich wurde sie durch einen Erdbeben auf eine der Stützmauern des terrassenförmig angelegten Geländes geschoben. Auf dieser Steinmauer stützt sie sich nach unten ab. Mit zwei kräftigen Zugwurzeln, die rechts und links des Stammes hangaufwärts verlaufen, verankert sie diesen in dem steinigen Erdreich. Die Eiche wird von Bäumen mit mächtigen Kronen, die in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft stehen, überragt. Um dennoch genügend Licht zu erhalten, bildete sie eine durch extrem lange Hebelarme gekennzeichnete hangabwärts gerichtete schmale Krone aus.

Beim Bohren zeigten sich im Bereich der oberen Bohrkerne bereits Stellen starker Holzzersetzung, die ca. 1,5 bis 2 cm unter der Rinde begann und sich bis in den Bereich des Kernholzes fortsetzte. Im mittleren und unteren Krümmungsbereich waren die Bohrkerne nur unmittelbar unter der Rinde und im Bereich des Kernholzes mit dem Fractometer auswertbar. Im Abschnitt dazwischen konnte stellenweise das Holz mit bloßen Fingern zerrieben werden.

Die Fractometermessungen wurden zu Beginn des Frühjahres durchgeführt. Der Stammdurchmesser in Höhe der obersten Bohrung betrug 34 cm.

Obwohl die Bereiche des schlecht tragenden Holzes geringer Festigkeit in der FE-Simulation nicht berücksichtigt werden konnten, ergab sich eine gute Übereinstimmung von Festigkeits- und Spannungsverteilung.

Als Biegefestigkeitsmittelwert der oberen zwei Bohrkerne ergab sich 20,8 Mpa. Für die zwei Bohrkerne, die durch das Extremum verliefen, ergab sich als arithmetisches Mittel 28,9 MPa. Dies entspricht einer Festigkeitserhöhung von mehr als 38%. Die Maximalwerte der Bohrkerne aus dem Krümmungsbereich sind um den Faktor 1,63 größer als die aus den oberen Bohrproben.

EICHE 2 (Tafel 18)

Dieser Baum steht im Pfälzer Wald, nahe der Burgruine Ramburg. Er hat einen Stammdurchmesser von ca. 40 cm (gemessen an der oberen Zuwachsbohrung). Der Standort ist sehr hell und mäßig geneigt. Der Boden ist weich und sandig. Der untersuchte Wurzelanlauf zeigt hangaufwärts. Der Stamm der Eiche ist leicht nach unten, auf eine kleine Lichtung zu geneigt. Die Untersuchungen wurden im Spätsommer durchgeführt.

Ein Vergleich der mit dem Fractometer ermittelten radialen Biegefestigkeitsverteilung und der Querspannungsverteilung, die sich unter Biegebelastung einstellt, ergibt eine sehr gute Übereinstimmung. An denjenigen Stellen, die durch Querspannungen hoch belastet sind, formiert der Baum auch die höchsten Holzfestigkeiten in radialer Richtung.

Die zwei Bohrkerne aus dem Bereich der höchsten gemessenen Festigkeitswerte liegen im Mittel um 77% höher als die Festigkeiten der oberen zwei Bohrkerne, aus dem bereits geraden Stammabschnitt.

ESCHE 2, 3 und 4 (Tafel 19 bis 21)

(Erstveröffentlichung: Journal of Arboriculture Vol. 21 (2), 83- 87, 2/ 95)

Bei diesen Eschen handelt es sich um ca. 25 bis 30 m hohe Bäume, die nordwestlich von Karlsruhe nahe einem früheren Flußbett stehen. Der Boden ist ganzjährig feucht und weich. Zu Zeiten großer Niederschlagsmengen ist der Standort oft überflutet.

Die Eschen erhalten vorwiegend Windbelastung aus Westen, was sich in einer deutlichen Brettwurzelformation auf dieser Seite widerspiegelt. Bei allen drei Bäumen wurden auf dieser Stammseite Bohrkerne entnommen und der Wurzelanlauf untersucht. Dies geschah zu Beginn der Vegetationsperiode Ende Februar.

Die Stammdurchmesser im Bereich der oberen Bohrkernentnahmestelle waren 46 cm für Esche 1, 40 cm für Esche 2 und 42 cm für Esche 3. Ein Vergleich der mit dem Fractometer gemessenen Biegefestigkeitsverteilung mit der für Biegebelastung ermittelten Querspannungsverteilung ergibt eine gute Übereinstimmung. Die Querbiegefestigkeiten sind an derjenigen Stelle am größten, an der auch die höchsten Spannungen senkrecht zum Längsfaserverlauf berechnet wurden.

Ein Vergleich der mittleren Festigkeiten der oberen zwei Bohrproben mit denjenigen Zuwachsbohrkernen aus dem Krümmungsbereich, die das Festigkeitsmaximum enthielten, ergab eine Querspannungszunahme von 12,5 MPa bei Esche 1, 17,6 MPa bei Esche 2 und 11,5 MPa bei Esche 3. Dies entspricht einem Faktor 1,4, 2,2 bzw. 1,3 in der Festigkeitserhöhung zwischen geradem Stamm und delaminationsgefährdetem Wurzelanlauf.

ESCHE 5 (Tafel 22)

Diese Esche wurde in frühem Alter umgedrückt oder ist in Folge zu hoher Windbelastung auf dem sehr weichen und feuchten Boden eines Überflutungsgebietes umgestürzt. Der damalige Wipfeltrieb starb und ist nur noch als morsches Fragment mit ca. 14 cm Durchmesser im unteren Stammbereich zu erkennen. Ein Seitenast hat damals die Führungsposition eingenommen und wurde zum *neuen* Stamm. Dieser hat im Bereich der oberen Bohrung einen Durchmesser von 48 cm. Ein Absinken im tiefen Erdreich erforderte eine starke Verbiegung des Seitenastes, der jetzt wieder mit weitgehend geradem Stamm den Kronenschwerpunkt über seinem Wurzelstock plazieren konnte. Untersucht wurde diese Esche zu Beginn des Frühjahres.

Durch die große Krümmung des Stammes ergeben sich bei Biegebelastung, die den Krümmungsradius zu vergrößern suchen, Querspannungen im Bauminnern. Auch bei dieser Esche konnten durch die Fractometermessungen an denjenigen Stellen hohe Querspannungen ermittelt werden, an denen mittels FEM-Kalkulation die höchsten Querspannungen berechnet wurden.

Als Biegefestigkeitsmittelwert der oberen zwei Bohrkerne ergab sich 11,7 MPa. Für die zwei Bohrkerne, die durch den Bereich der höchsten Festigkeiten verliefen, ergab sich als arithmetisches Mittel 12,9 MPa. Dies entspricht einer Festigkeitserhöhung von ca. 10% von oben nach unten zum Ort der größten Krümmung hin. Der Maximalwert aus den Bohrkernen, die aus dem Krümmungsbereich stammen, ist um den Faktor 1,3 größer als der aus den oberen Bohrproben.

FICHTEN 1 bis 6 (Tafeln 23 bis 28)

Die Werte der Fichten 1 bis 6 entstammen der Arbeit von SCHMIDT (1994a).

Die Fichten 1 bis 6 stehen im Forstrevier Edenkoben in einer Verschneidungszone. Ihnen allen gemeinsam ist die deutliche Ausbildung einer Brettwurzel auf derjenigen Seite des Stammes, die in die Richtung der Hauptwindbelastung zeigt. Die Fichtenstämme haben die Durchmesser 32 cm (Fichte 5), 37 cm (Fichte 3), 39 cm (Fichte 6), 42 cm (Fichte 1), 45 cm (Fichte 2) und 57 cm (Fichte 4). Diese Werte beziehen sich jeweils auf den Ort der obersten Zuwachsbohrung.

In allen betrachteten Fällen wurde eine Querspannungsverteilung gefunden, die sich mit der Querbiegefestigkeitsverteilung aus den Fractometerversuchen weitgehend deckt. Dieses Ergebnis zeigt, daß auch Nadelbäume, die nur dünne, einreihige Holzstrahlen bilden, ihre Querfestigkeit auf die vorherrschende Belastung in optimaler Weise abstimmen. Das heißt: höhere Querfestigkeiten dort, wo auch höhere Belastungen in dieser Richtung auftreten.

Die mittlere Biegebruchfestigkeit für die oberen zwei Bohrkerne variierte bei allen sechs Fichten nur wenig und lag zwischen 8,5 und 13,8 MPa. Die Werte aus den Wurzelanläufen waren je nach Wurzelgeometrie und dadurch resultierender Verankerung im Erdboden sehr unterschiedlich. Für Fichte 1 ergab sich eine um den Faktor 2 höhere mittlere Querbiegefestigkeit im Wurzelanlauf. Fichte 6 hatte eine um den Faktor 1,8 höhere Festigkeit im Krümmungsbereich. Für die Fichten 3 und 4 konnte eine mittlere Querfestigkeit in diesem Bereich ermittelt werden, die 37% höher lag als im geraden Stamm. Lediglich bei den Fichten 2 und 3 konnte eine unterdurchschnittliche mittlere Festigkeitszunahme, von oben nach unten zum Krümmungsbereich hin, von 12% gemessen werden.

KASTANIE 1 (Tafel 29)

Diese Kastanie steht im Forstrevier Edenkoben im Pfälzer Wald. Der frühere Hauptstamm mit einem Stammdurchmesser von ca. 35 cm (in Bodennähe gemessen) wurde gefällt. Aus diesem Wurzelstock wuchsen mehrere junge Triebe zunächst nahezu horizontal heraus. Durch Zugholzanlagerung auf der Stammoberseite richteten sie ihre Stämme dann in senkrechte Position. Es entstand eine typische Säbelwuchssituation. Einer dieser Stämme wurde im Alter von 24 Jahren und einem Durchmesser (wenige cm oberhalb der ersten Bohrung) von 15 cm Anfang Januar untersucht.

Ein Vergleich der mit dem Fractometer ermittelten Festigkeitsverteilung mit der unter Biegebelastung errechneten Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf zeigt deutliche Übereinstimmungen. Die Festigkeiten sind in diesen Bereichen am größten, in denen die höchsten Spannungen kalkuliert wurden, die für eine Delamination an dieser Stelle verantwortlich sind.

Betrachtet man die Festigkeitswerte der oberen zwei Bohrkerne ergibt sich hieraus das arithmetische Mittel von 14,1. Die gleiche Betrachtung für die zwei Bohrkerne aus dem Bereich des Maximums ergibt einen mittleren Biegefestigkeitswert von 18,3 MPa, dies entspricht einer Festigkeitszunahme um den Faktor 1,3.

KASTANIE 2 (Tafel 30)

Dieser Kastanienstamm steht an einem sehr steilen über 50° geneigten Hang im Pfälzer Wald oberhalb Dernbach. Der lockere Boden und Wegebaumaßnahmen führten wohl zum Abrutschen des Wurzelstocks. Der stark ovalisierte Stammdurchmesser im Krümmungsbereich gibt einen Hinweis auf die enormen Zugholzanlagerungen auf der Stammoberseite, um den Stamm wieder zurückzubiegen und somit den Kronenschwerpunkt erneut über dem Wurzelzentrum zu plazieren.

Der dadurch erhöhten Gefahr der Faserdelamination durch unweigerlich auftretende Querzugspannungen begegnet die Kastanie mit Holz, das stark erhöhte Querbiegefestigkeiten in diesem Bereich aufweist.

Die Querfestigkeiten der oberen zwei Zuwachsbohrungen ergeben gemittelt 13,4 MPa, die Festigkeiten aus dem Krümmungsbereich hingegen 17,2 MPa, was einer Festigkeitssteigerung um den Faktor 1,3 entspricht. Für die jeweiligen Maximalwerte aus den Bohrkernpaaren ergibt sich eine Festigkeitszunahme von 22,8 MPa (oben) auf 26,2 MPa für die Bohrkernpaare aus dem Krümmungsbereich.

PAPPEL 1 (Tafel 31)

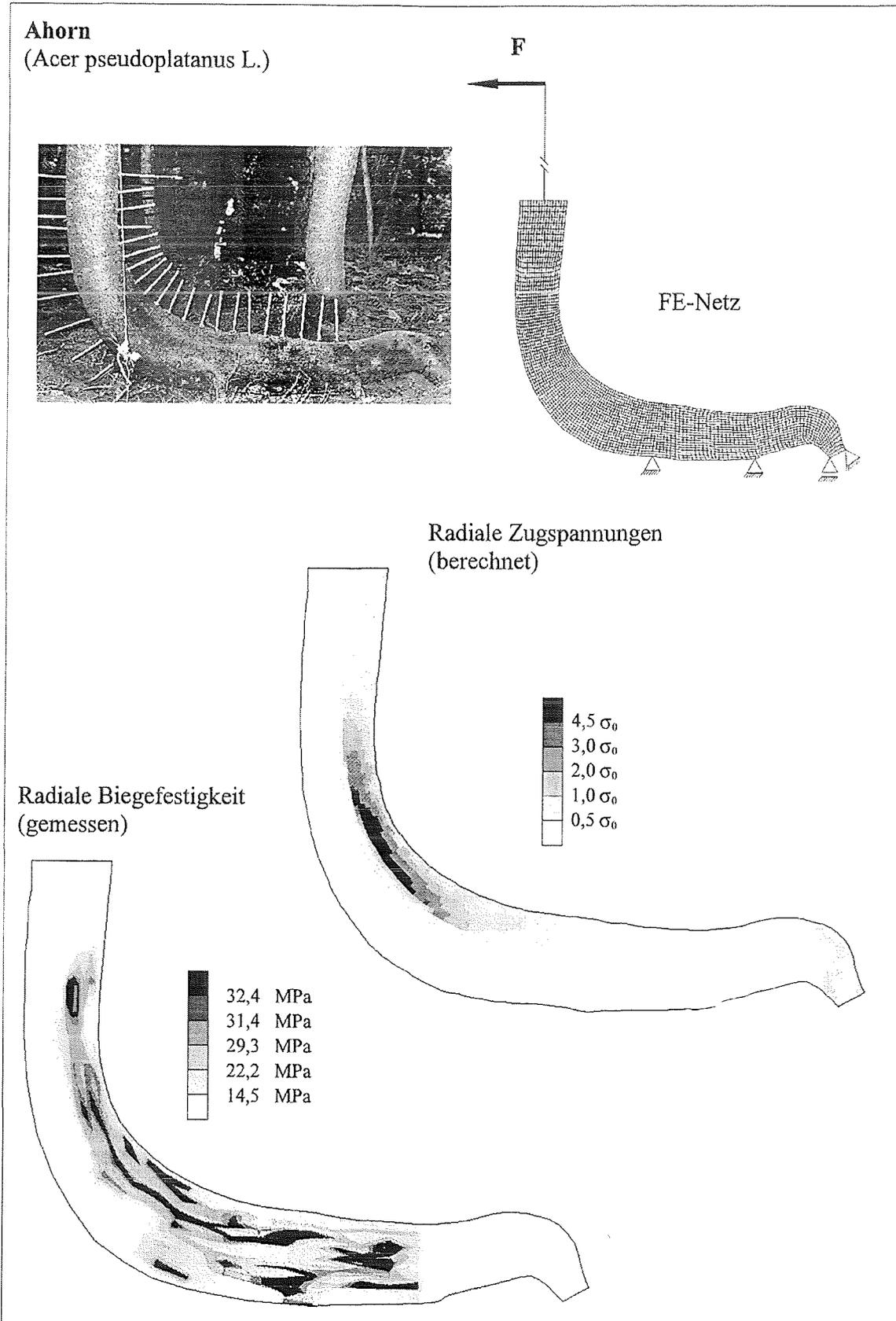
Die betrachtete Pappel hat mit ca. 107 cm den größten Stammdurchmesser von allen, innerhalb dieser Arbeit untersuchten Bäumen. Sie steht nordwestlich von Karlsruhe im Forstrevier Bellheim in den Rheinauen. Der freistehende Baum hat eine mächtige Krone und die Wurzelformation ist der Hauptwindrichtung (Westen) angepaßt.

Aus dem exakt nach Westen ausgerichteten Wurzelanlauf wurden 32 Zuwachsbohrkerne entnommen und mit dem Fractometer gebrochen. Die in Tafel 32 gezeigte Biegefestigkeitsverteilung stützt sich auf 576 gemessene Bruchwerte.

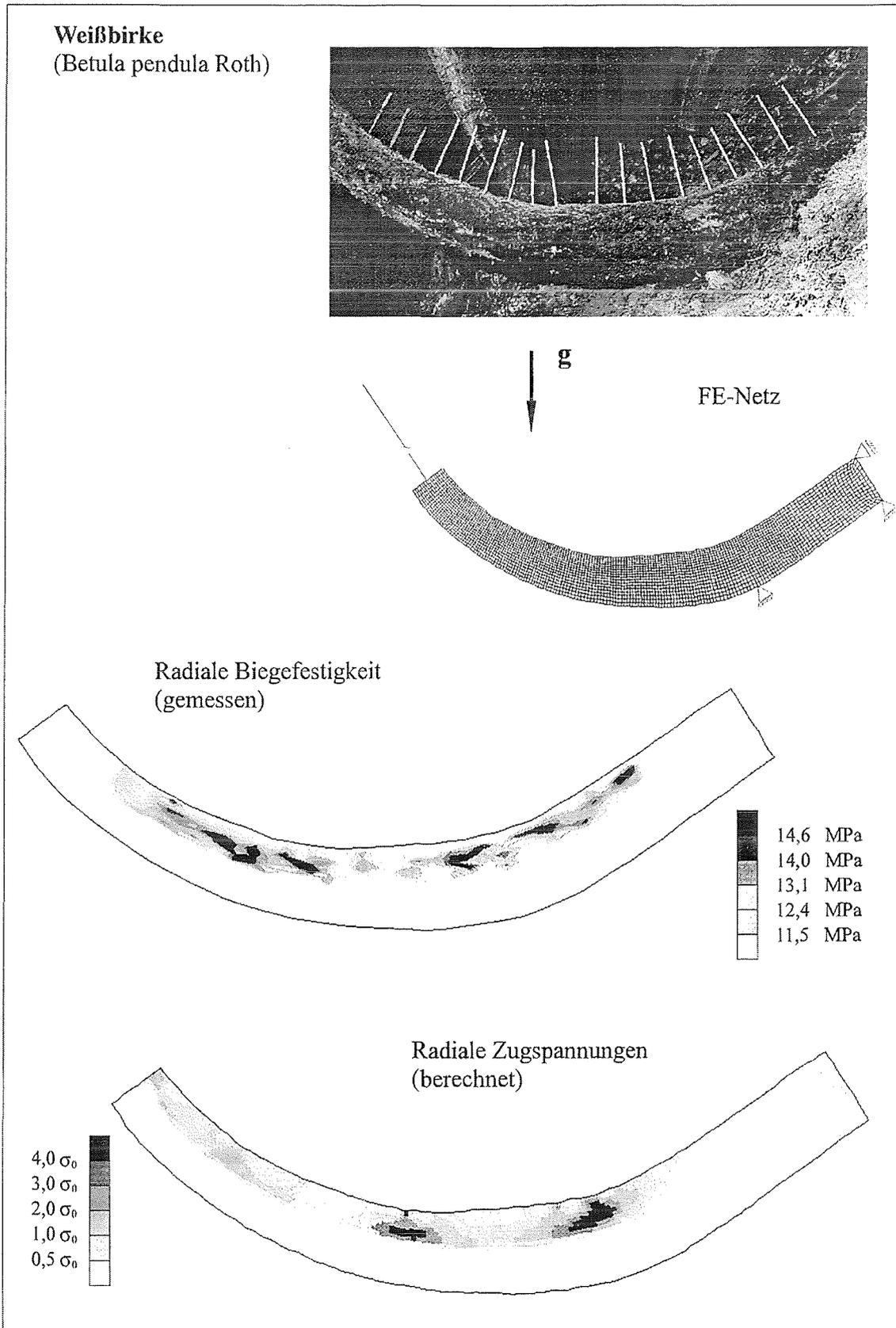
Auch hier konnte bedingt durch die eindeutigen Belastungs- und Lagerungsverhältnisse eine realitätsnahe FE-Simulation durchgeführt werden. Dieser Umstand und die gleichmäßige Faserorientierung führten zu einer sehr guten Übereinstimmung von Biegefestigkeitsverteilung und Querspannungen. Die radialen Biegefestigkeitswerte sind in dem Bereich des Wurzelanlaufs am höchsten, in dem auch, aufgrund der Unglücksbalkensituation, die radialen Zugbelastungen am stärksten sind.

Als Maximalwert konnte im Bereich der größten Krümmung der für Pappel ungewöhnlich hohe Bruchspannungswert von 19 MPa gemessen werden. Die oberen zwei Bohrkernpaare besaßen als Maximalwert 9,8 MPa. Als Mittelwert aus den Bruchspannungen der oberen Bohrproben ergab sich 8,7 MPa, für den Krümmungsbereich 12,4 MPa. Dies entspricht einer Steigerung in der radialen Biegebruchfestigkeit von 42%.

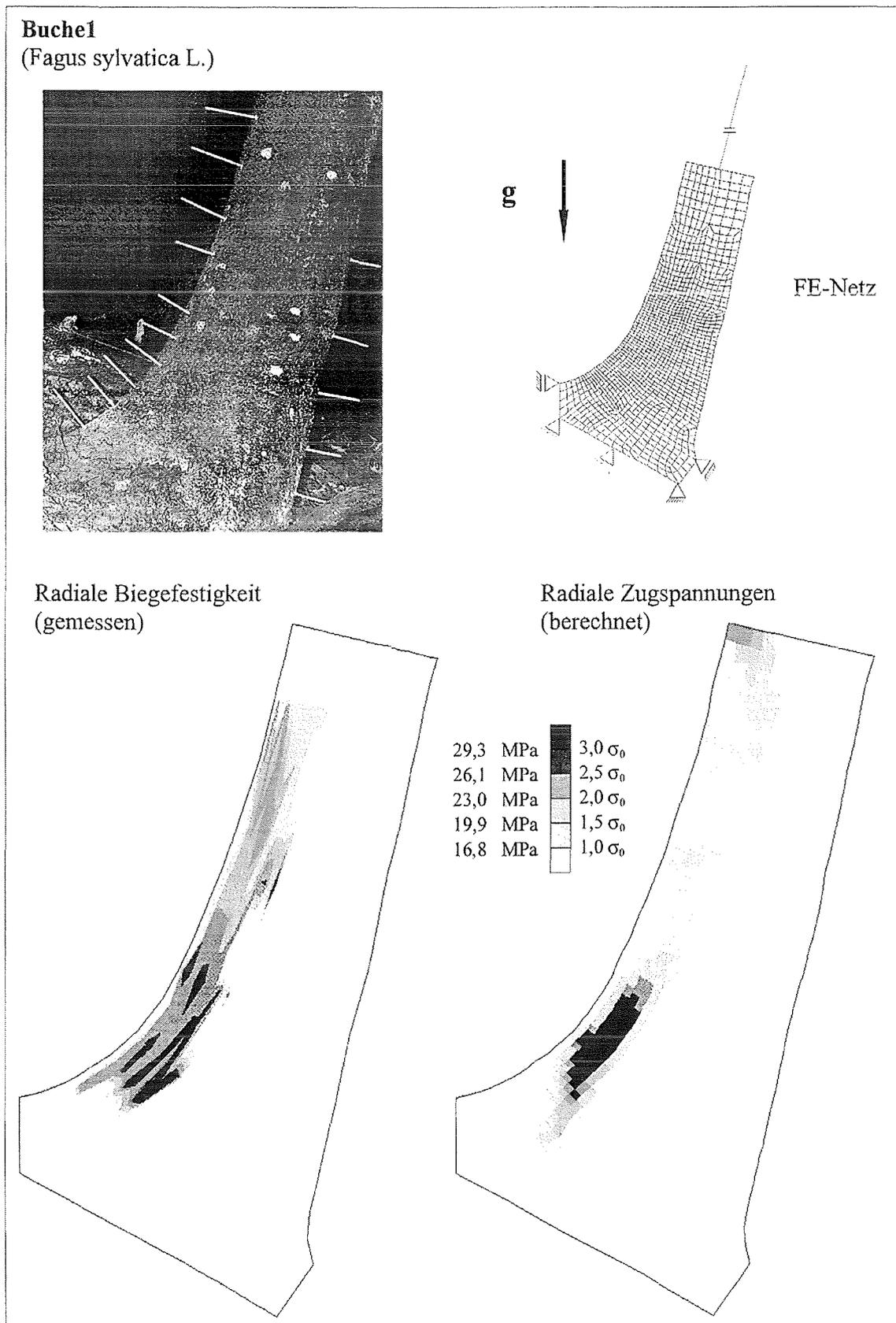
Ein Großteil der untersuchten Bäume besaß auf der Stammoberseite ausgeprägte Zugholzbereiche, so z. B. die Birke, der Ahorn und die meisten der untersuchten gekrümmten Buchenstämme. Diese vom Baum selbst induzierten Längsspannungen sowie andere Eigenspannungen (Wachstums-, und Umfangsspannungen) des Baumes wurden in der Querspannungsanalyse der FEM-Modelle nicht berücksichtigt. Die gute Übereinstimmung der Radialspannungsverteilungen der eigenspannungsfrei gerechneten Modelle mit den gemessenen Querfestigkeitsverteilungen rechtfertigt diese Vereinfachung.



Tafel 1: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).

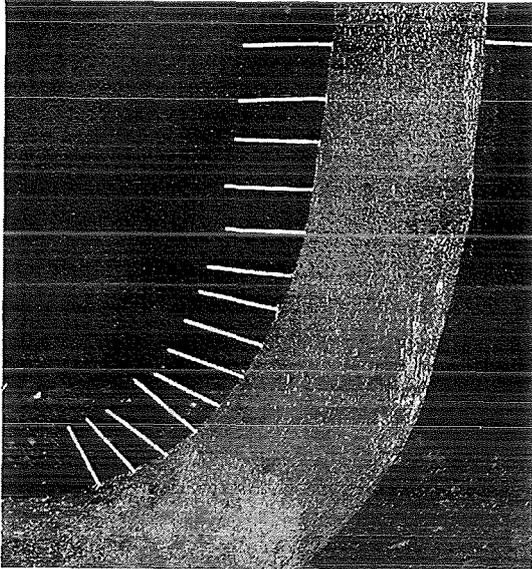


Tafel 2: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf.



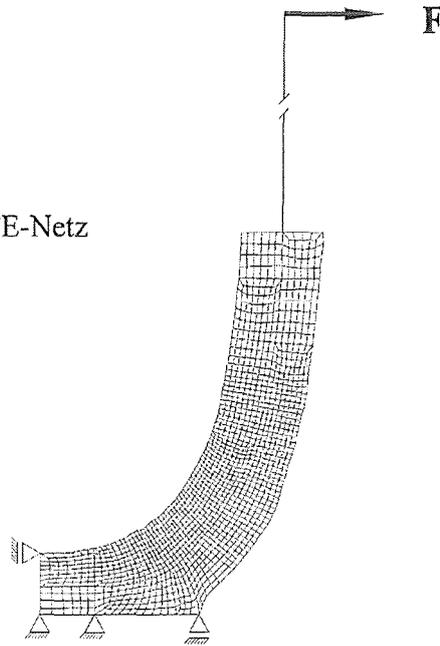
Tafel 3: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).

Buche 2
(*Fagus sylvatica* L.)

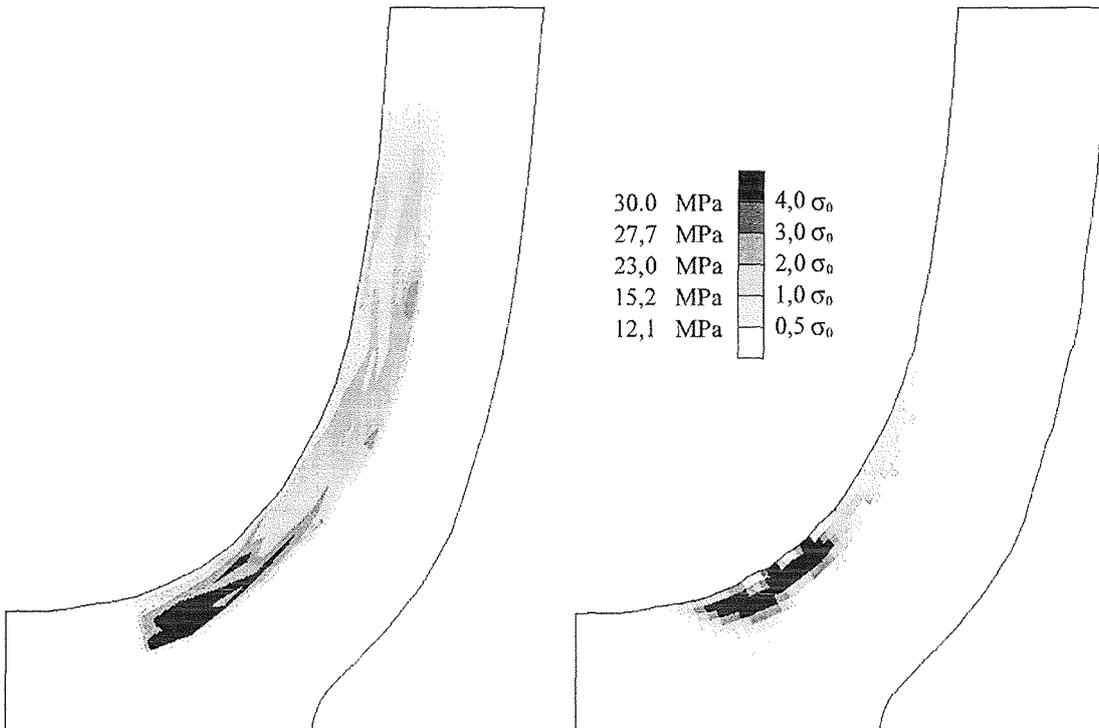


Radiale Biegefestigkeit
(gemessen)

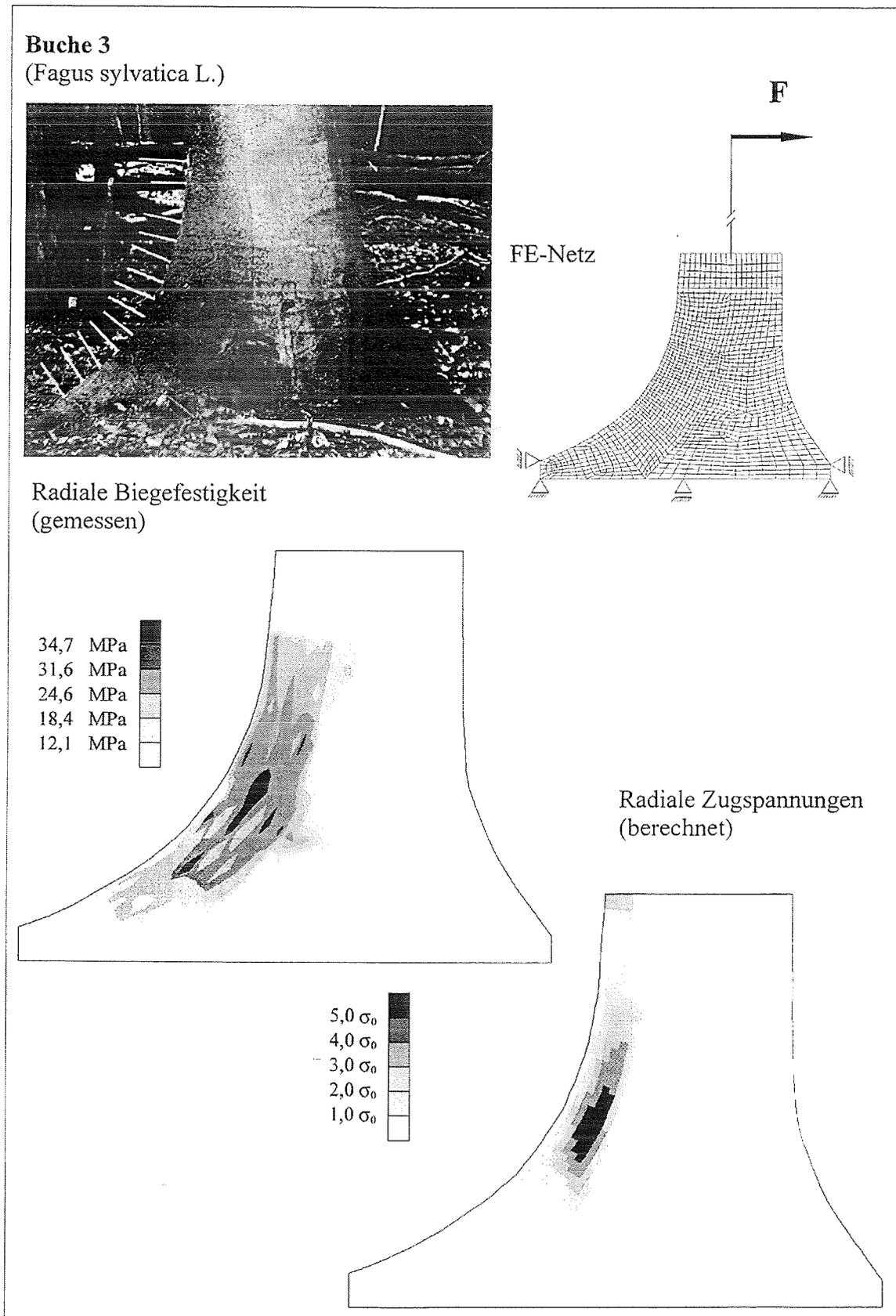
FE-Netz



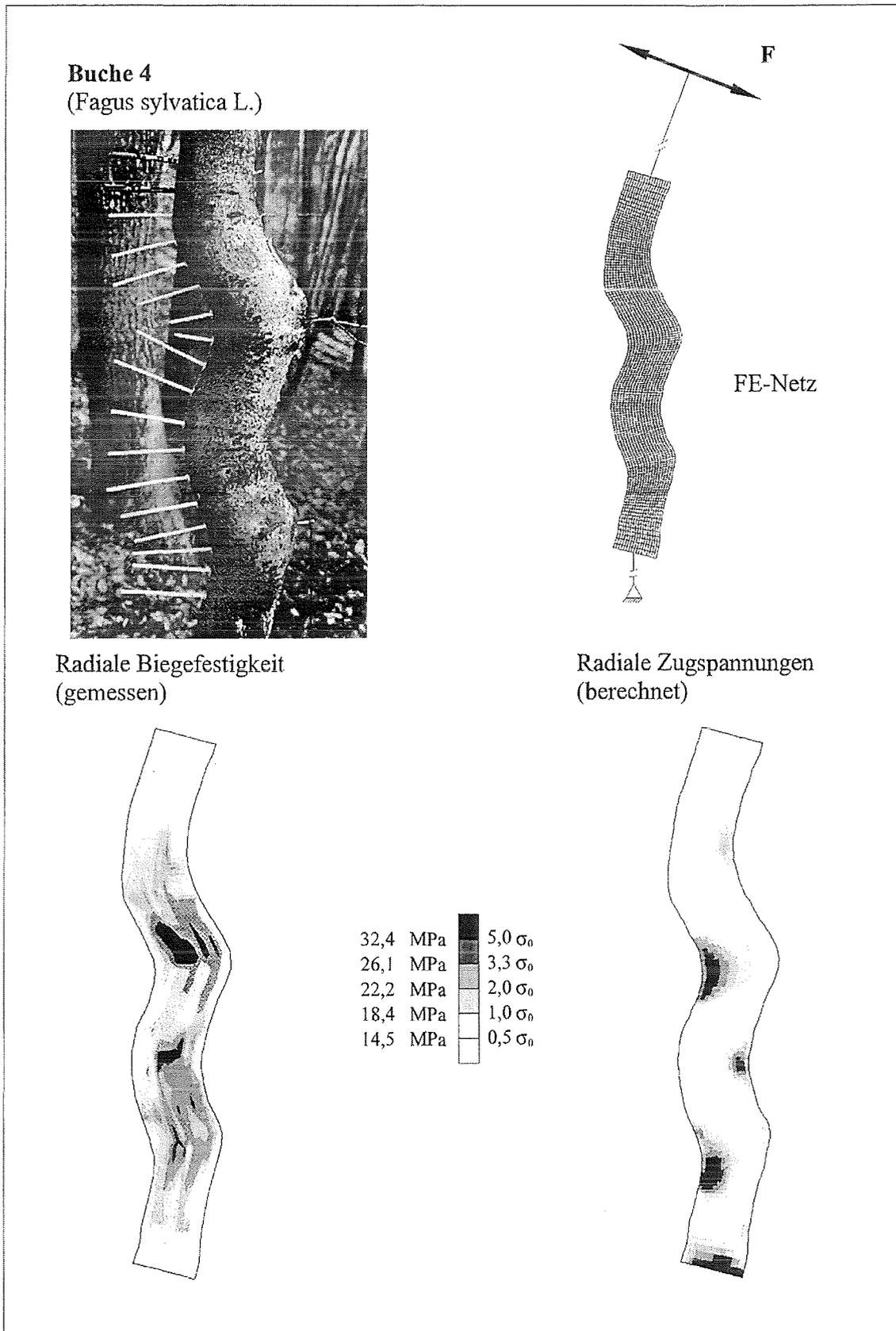
Radiale Zugspannungen
(berechnet)



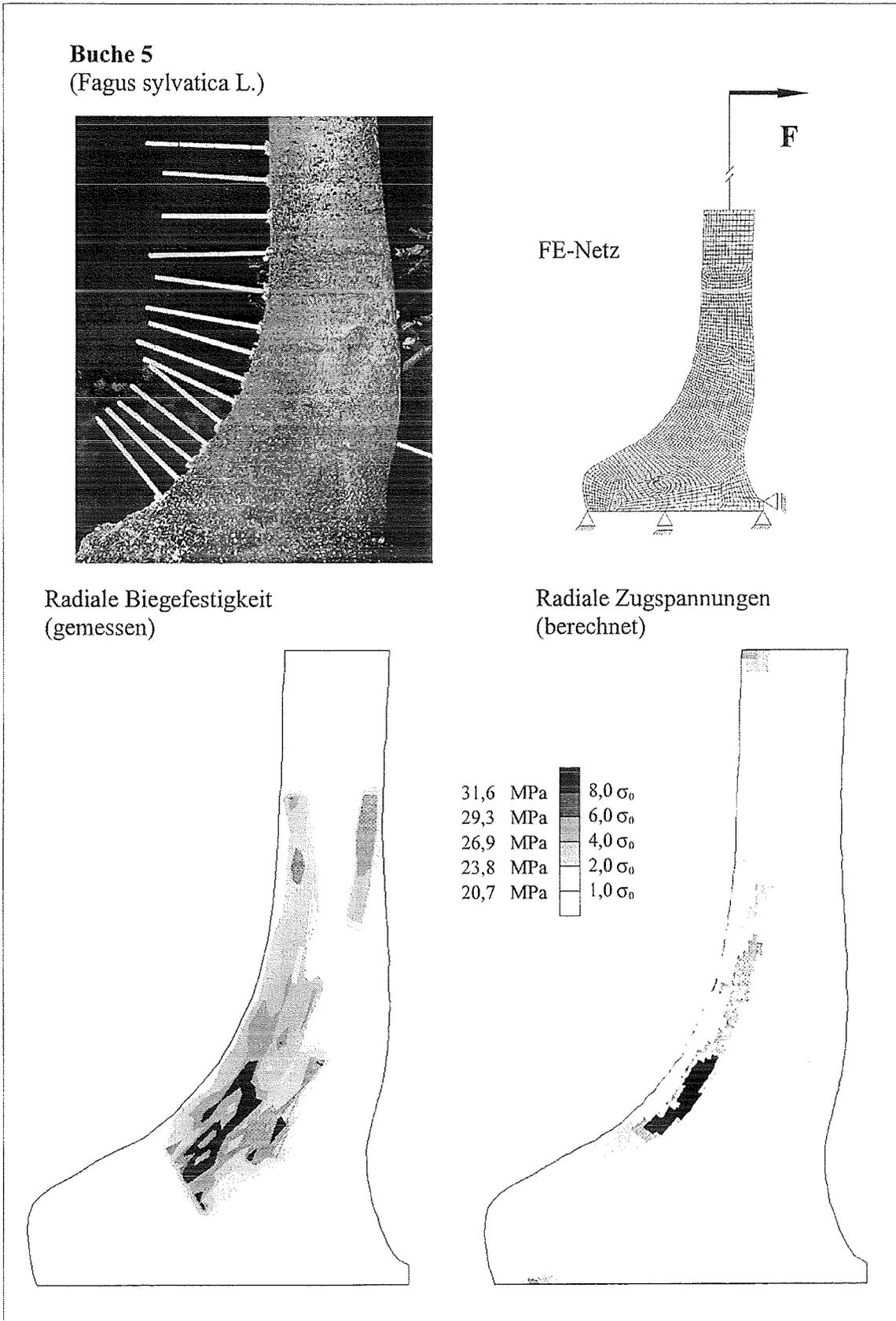
Tafel 4: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



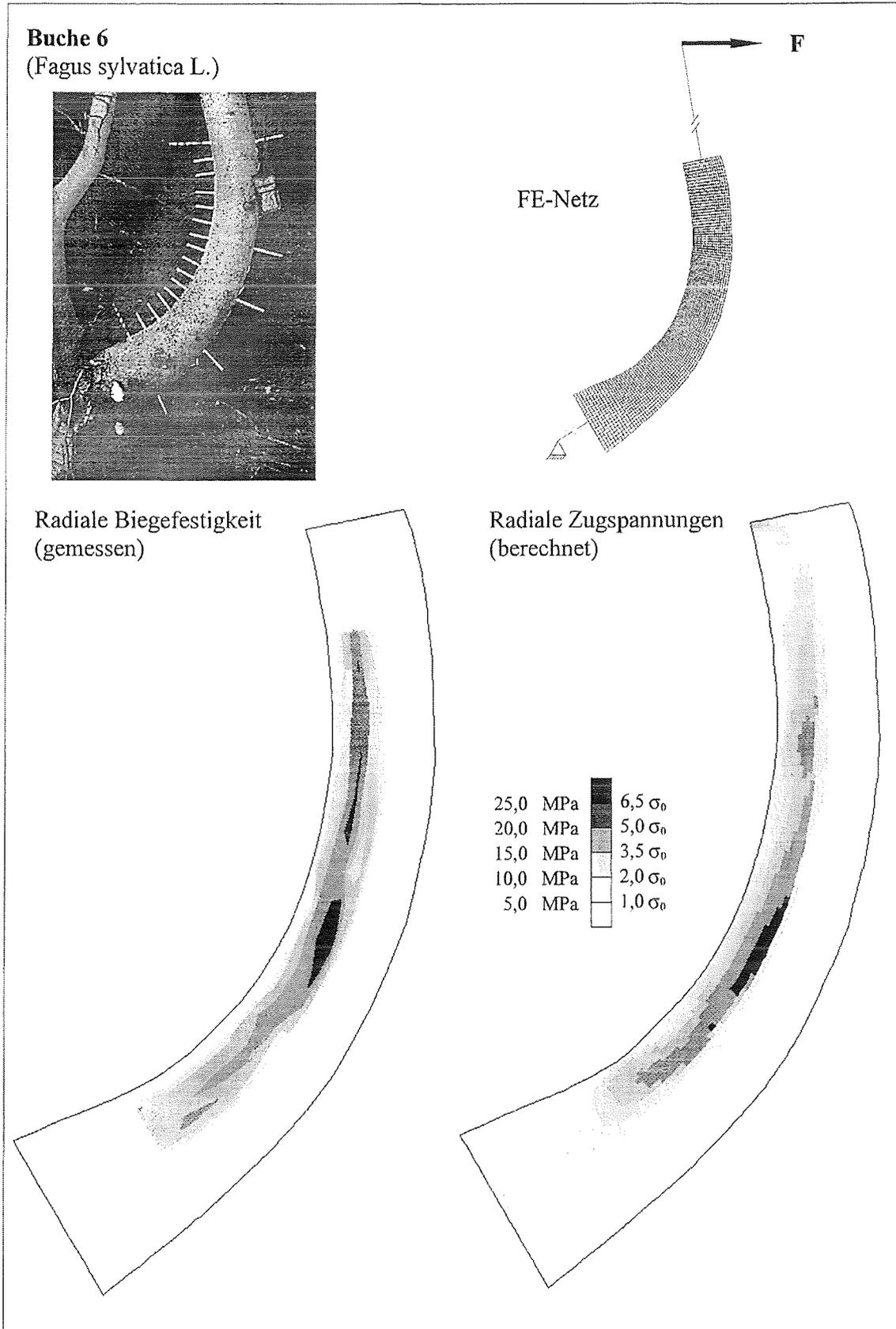
Tafel 5: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



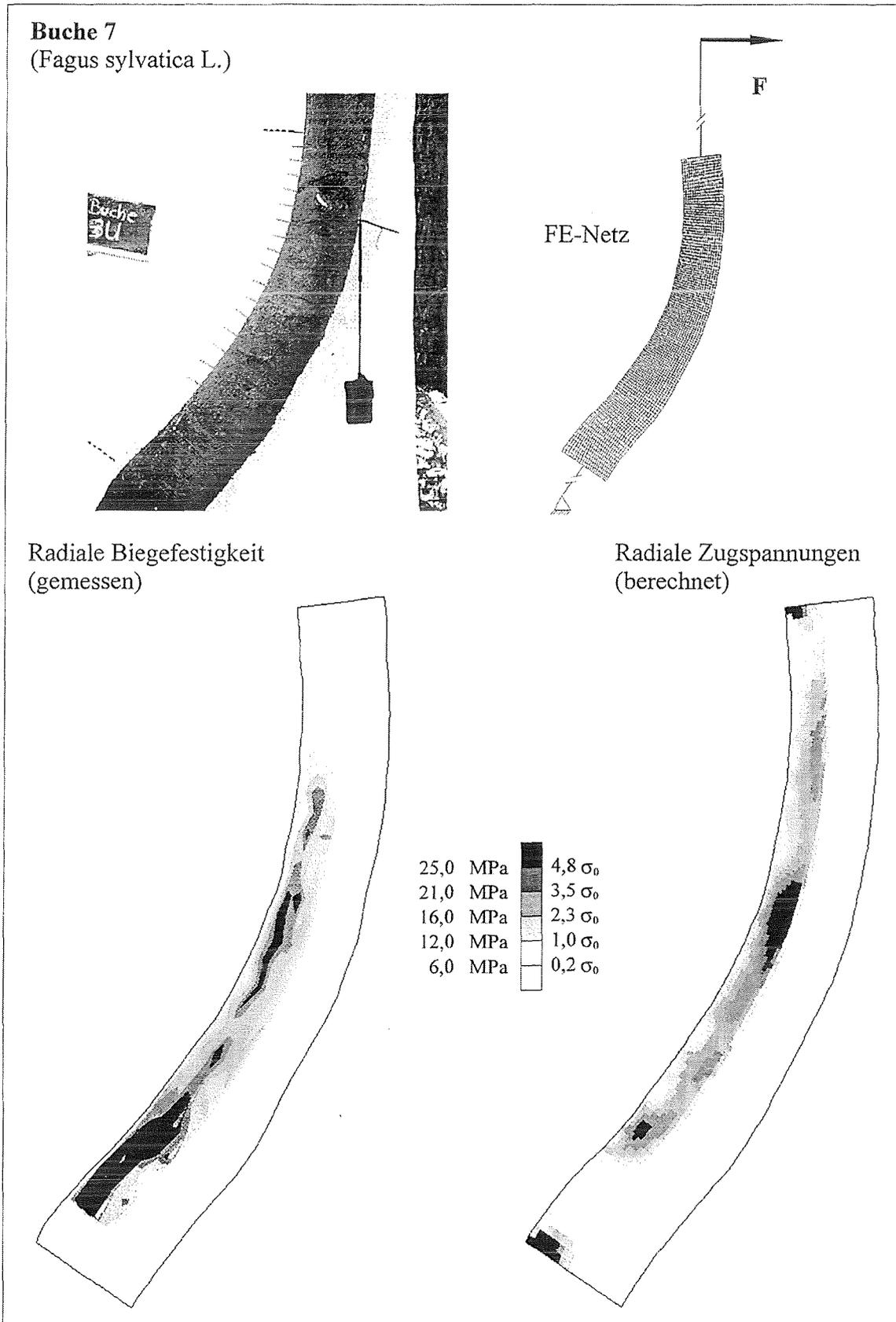
Tafel 6: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



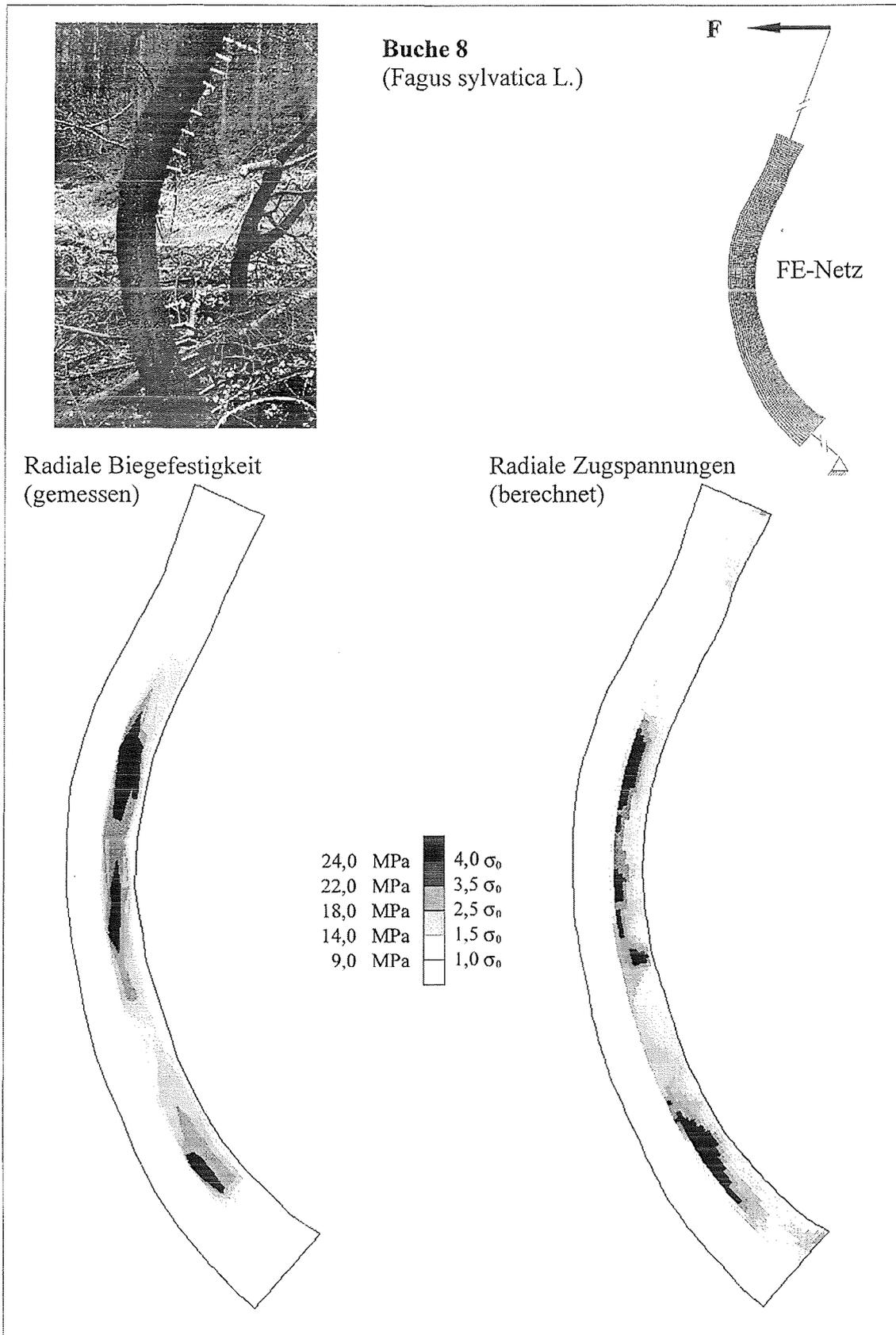
Tafel 7: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



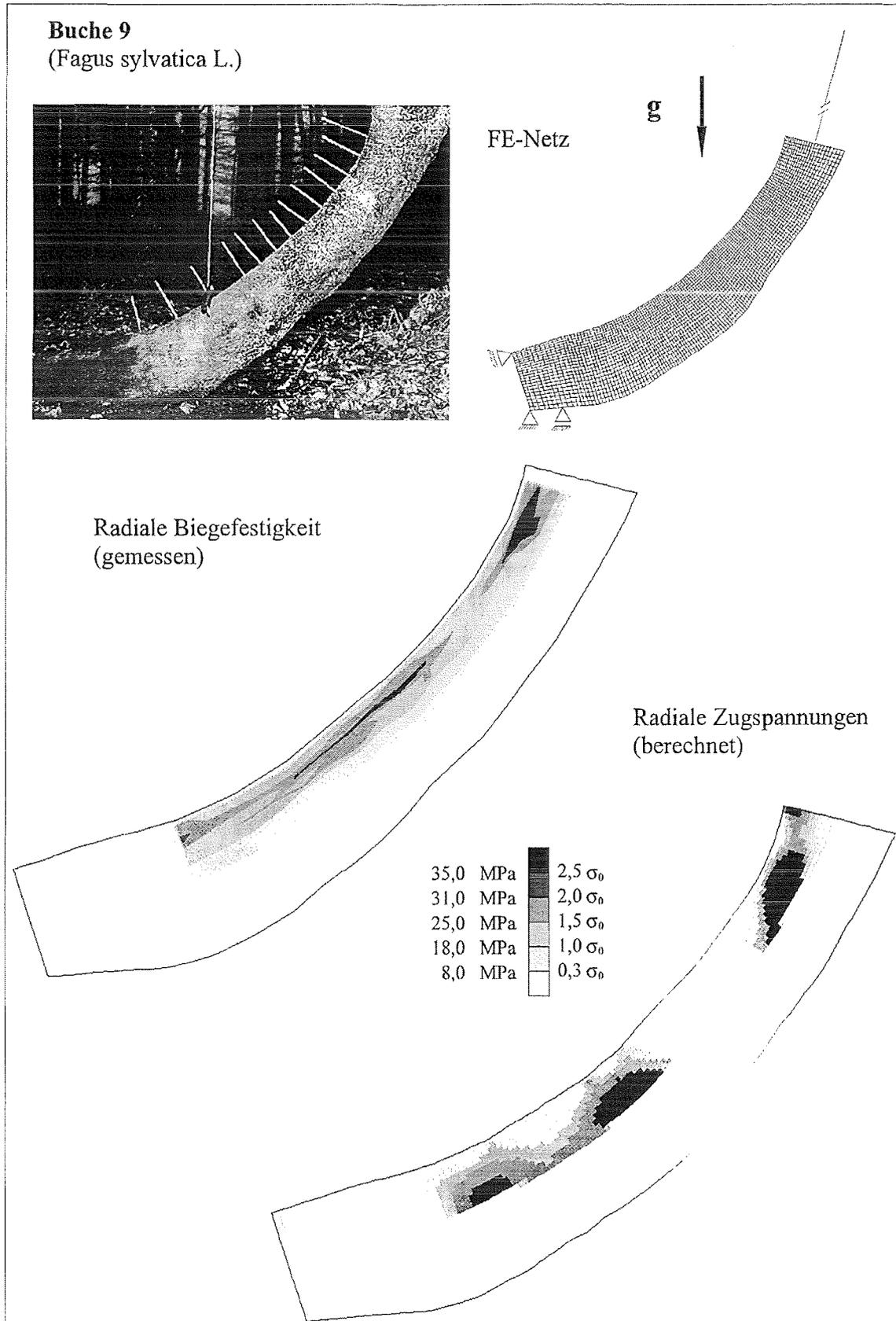
Tafel 8: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



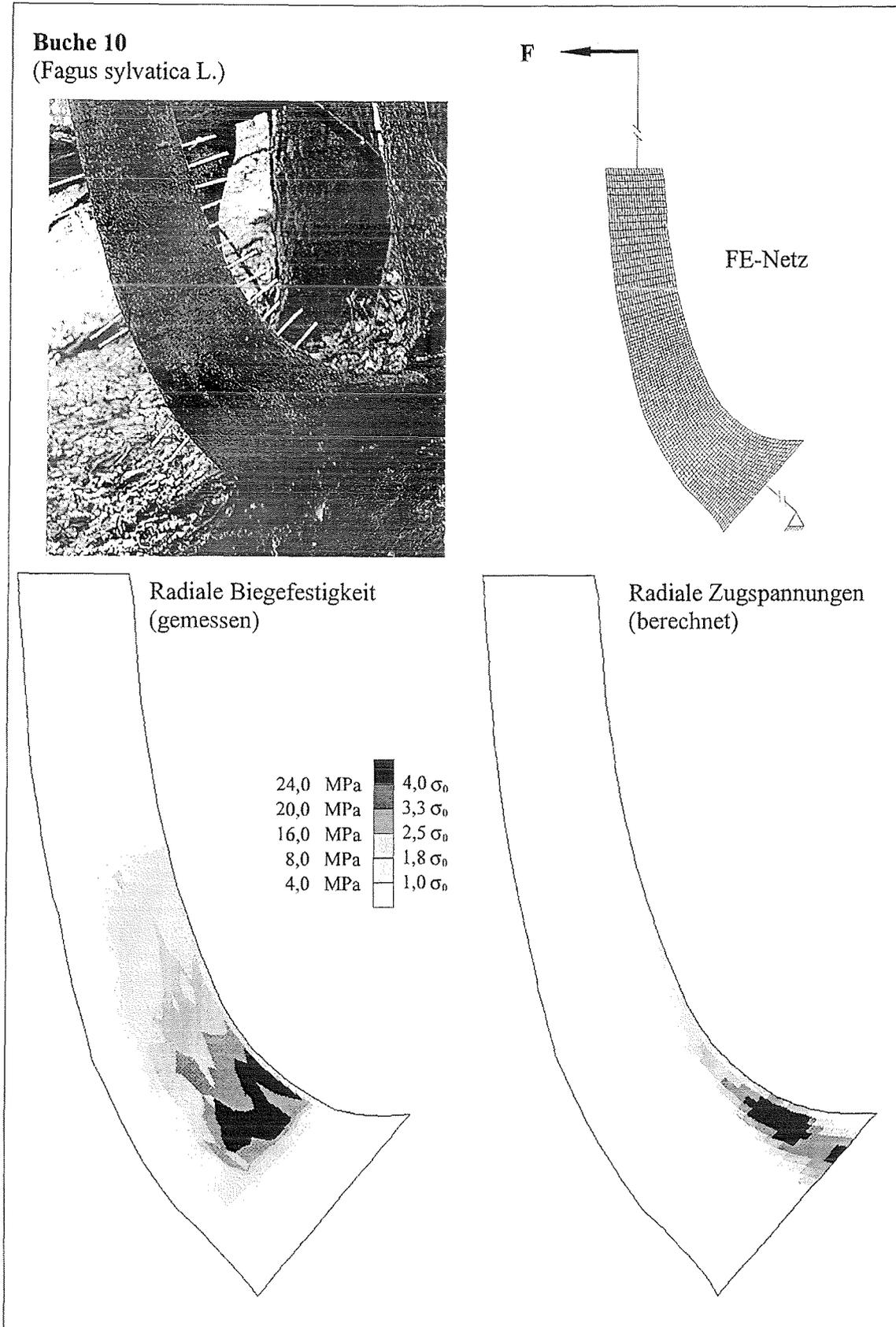
Tafel 9: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (dunkle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



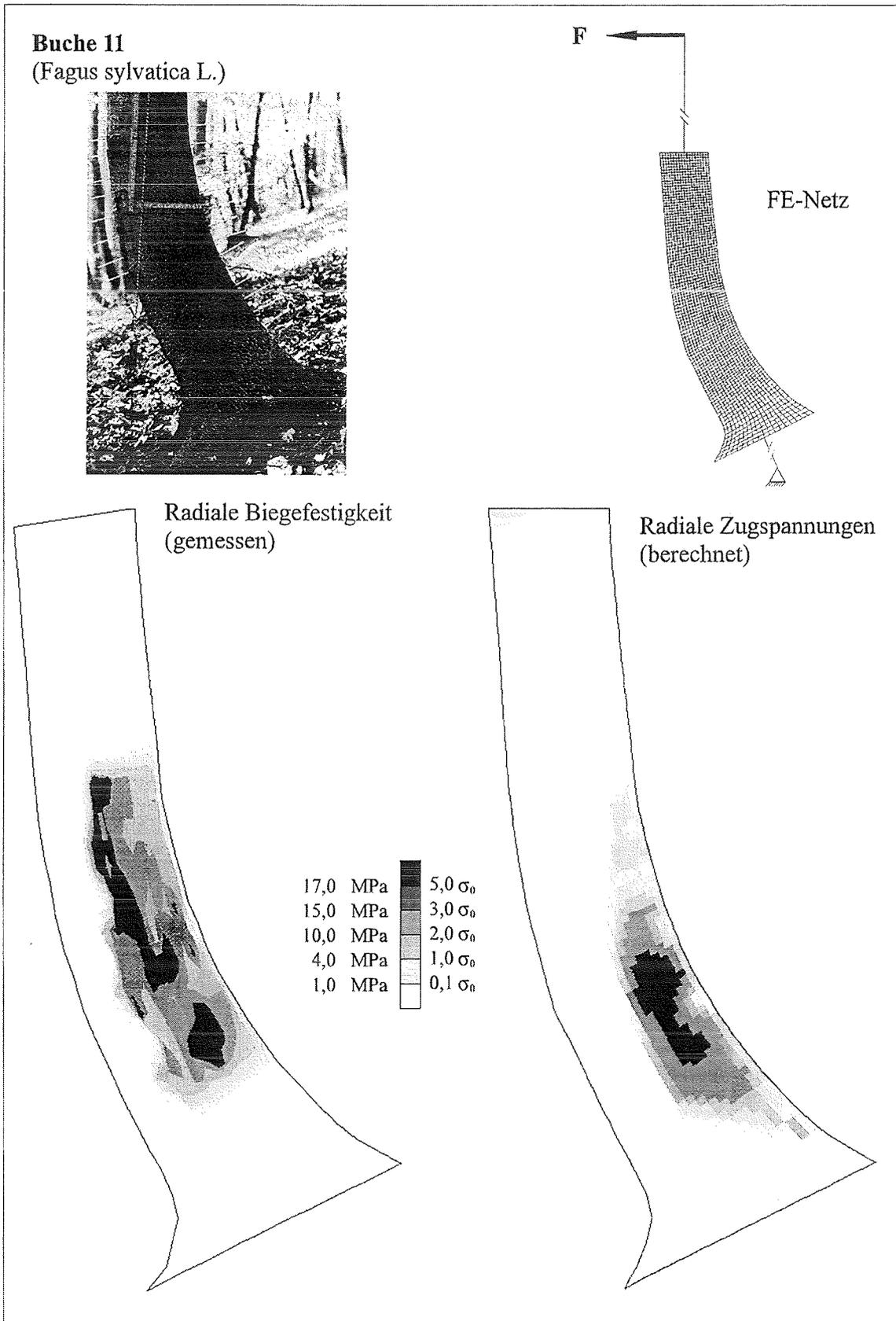
Tafel 10: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



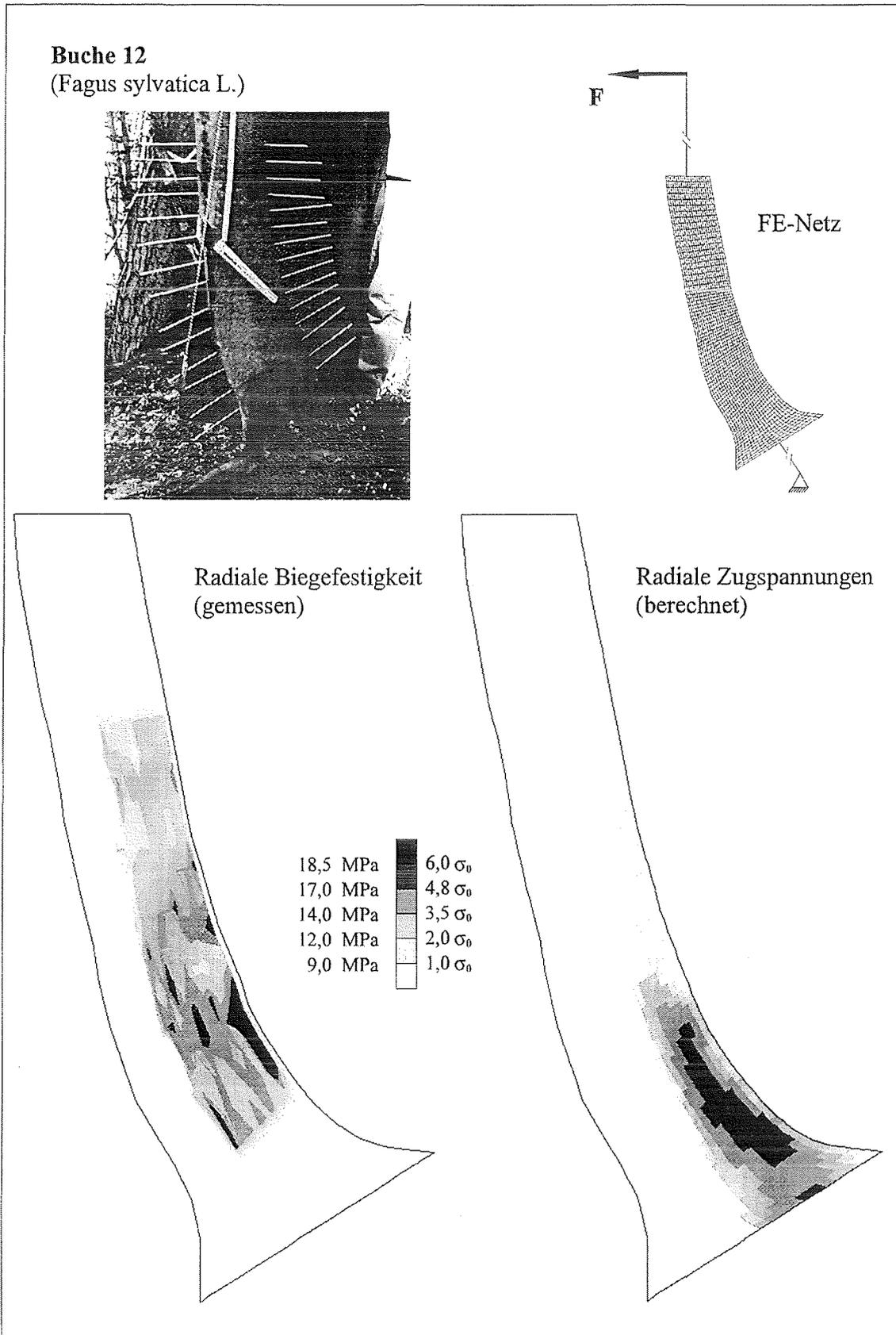
Tafel 11: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



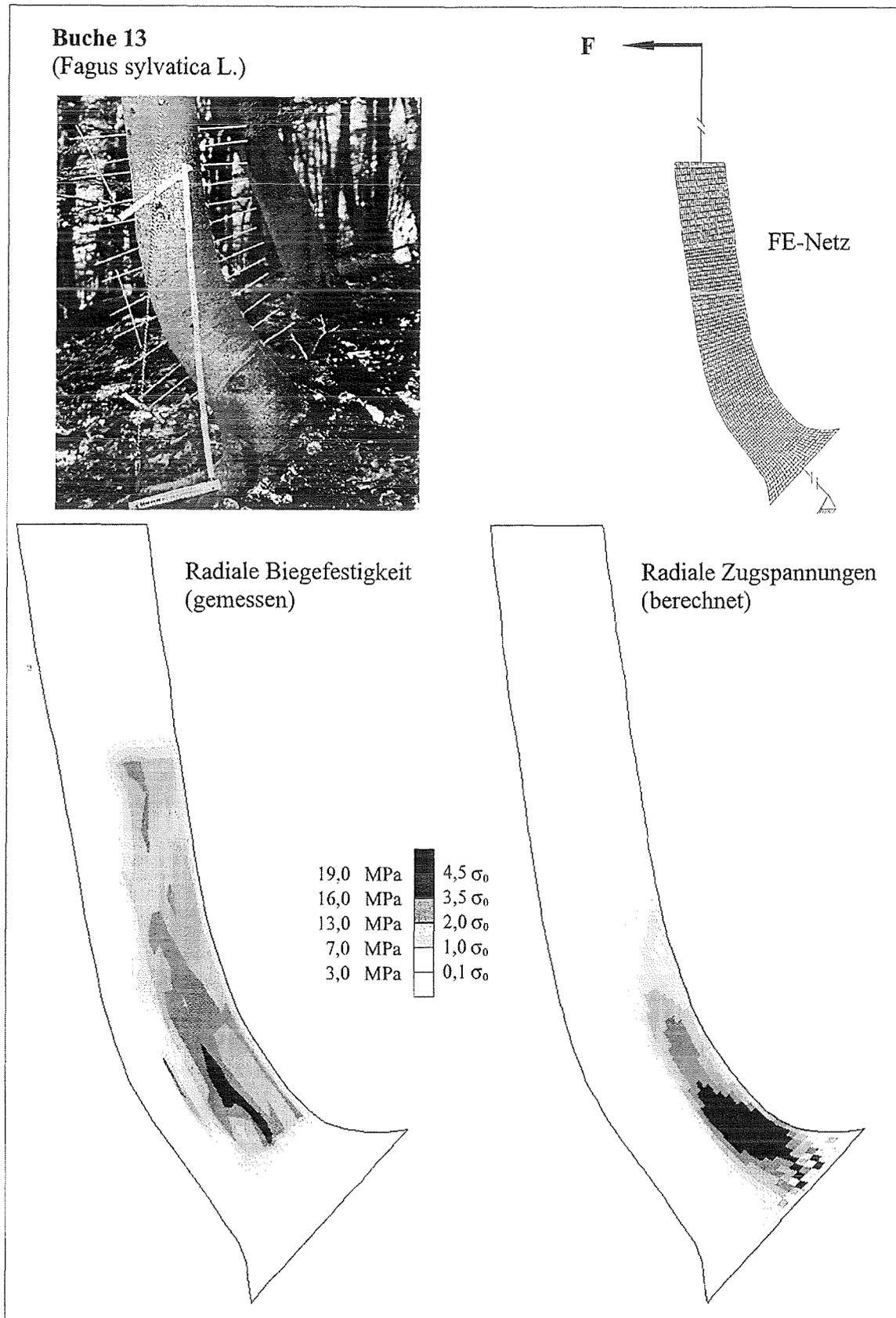
Tafel 12: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



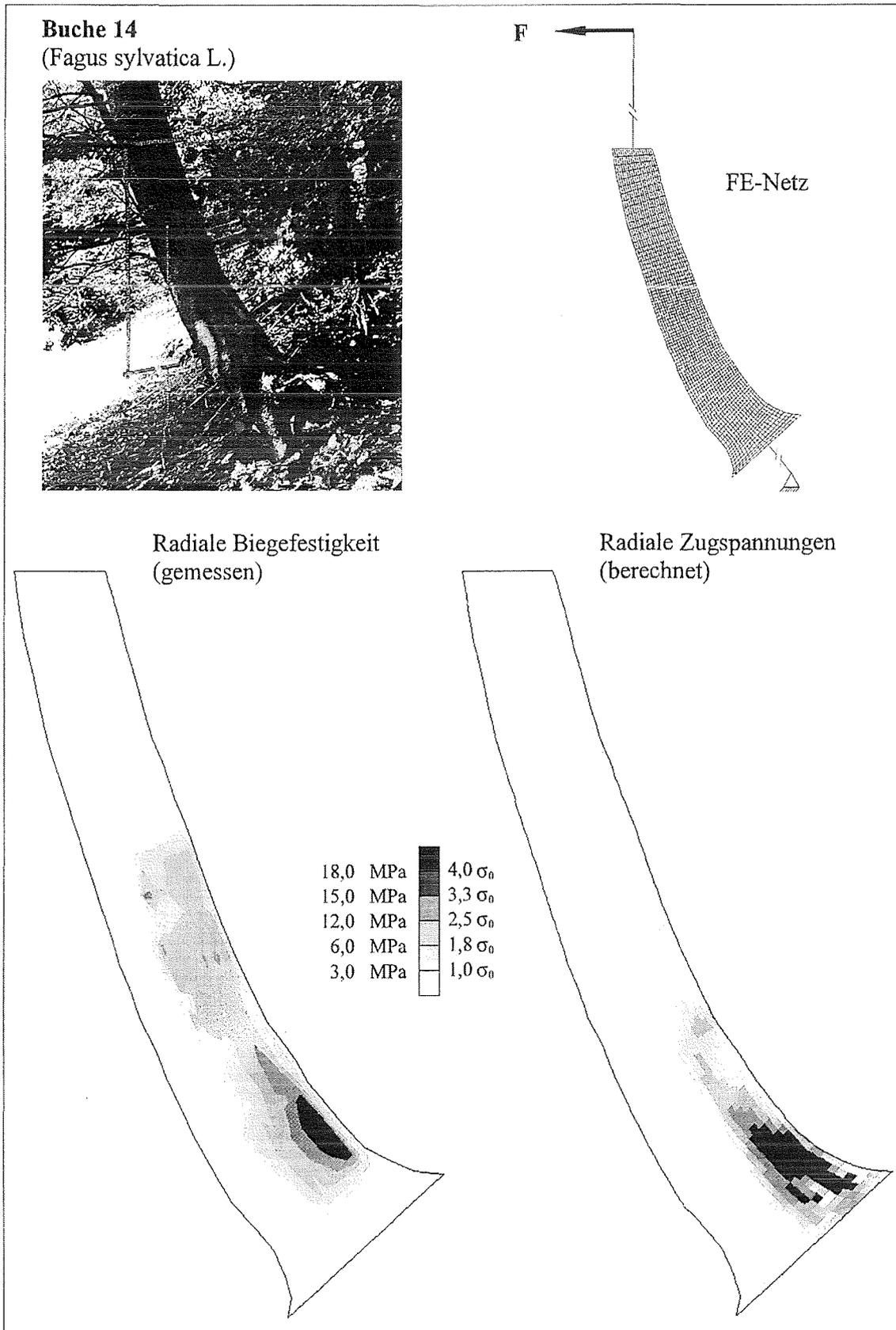
Tafel 13: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



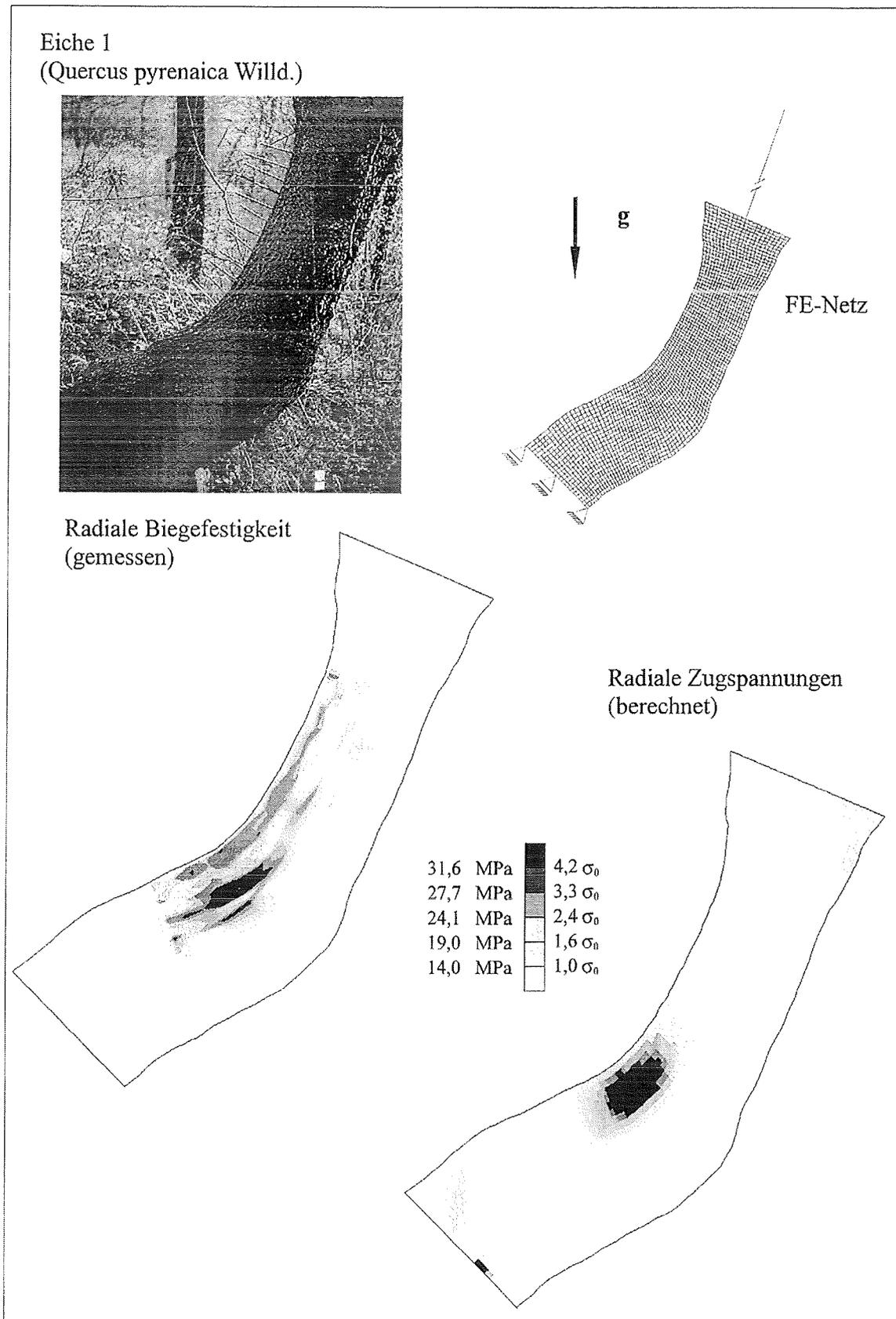
Tafel 14: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



Tafel 15: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).

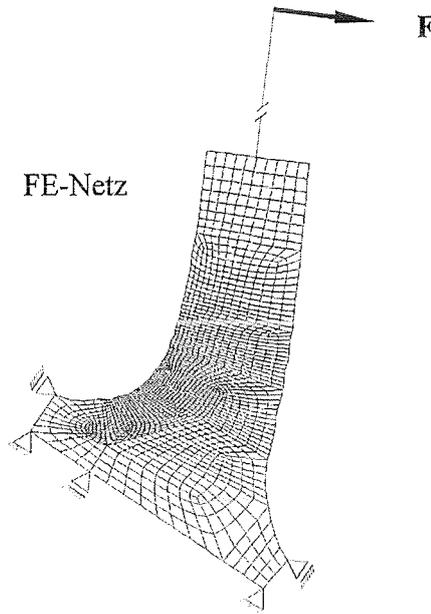


Tafel 16: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



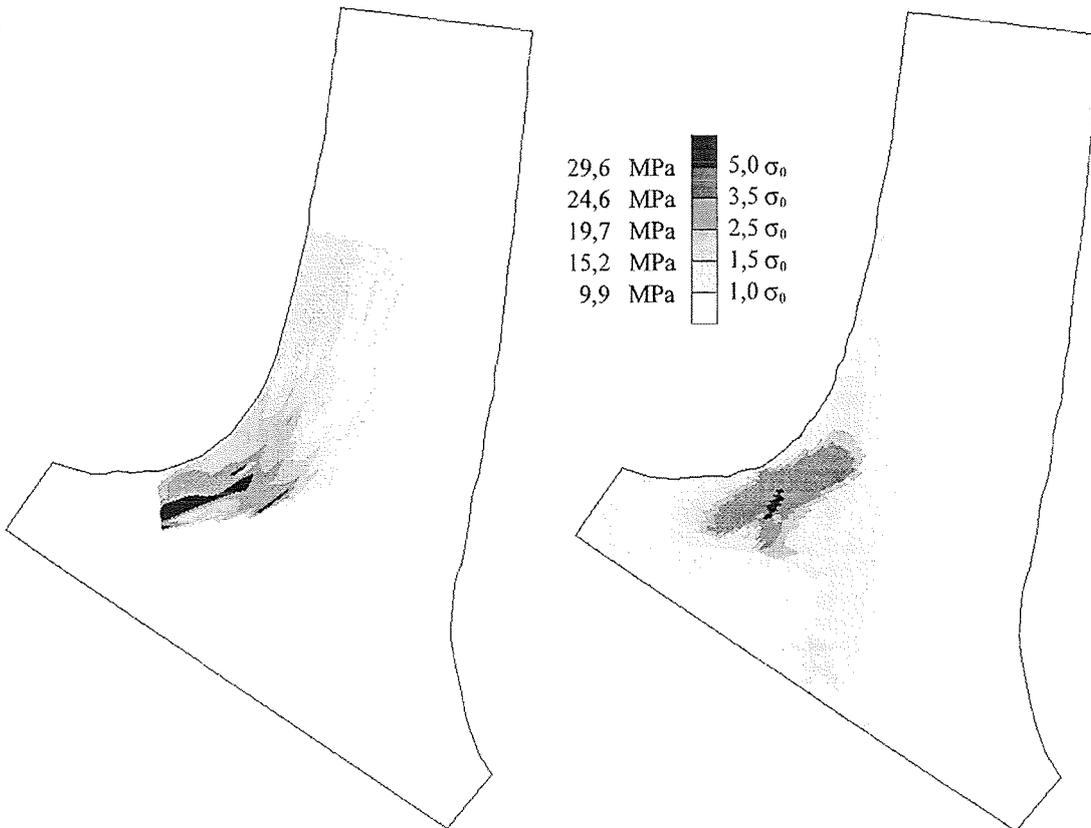
Tafel 17: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).

Eiche 2
(*Quercus robur* L.)

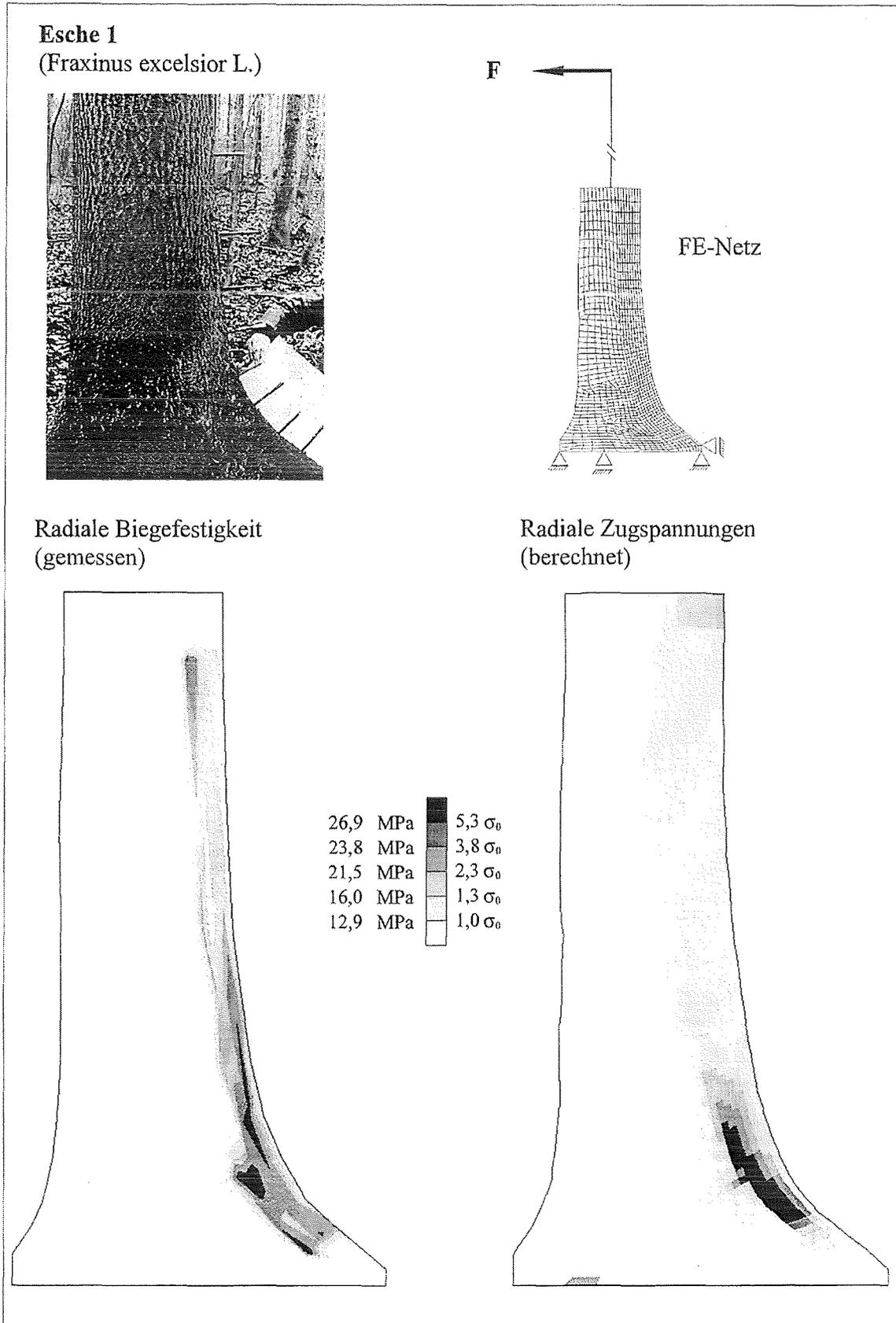


Radiale Biegefestigkeit
(gemessen)

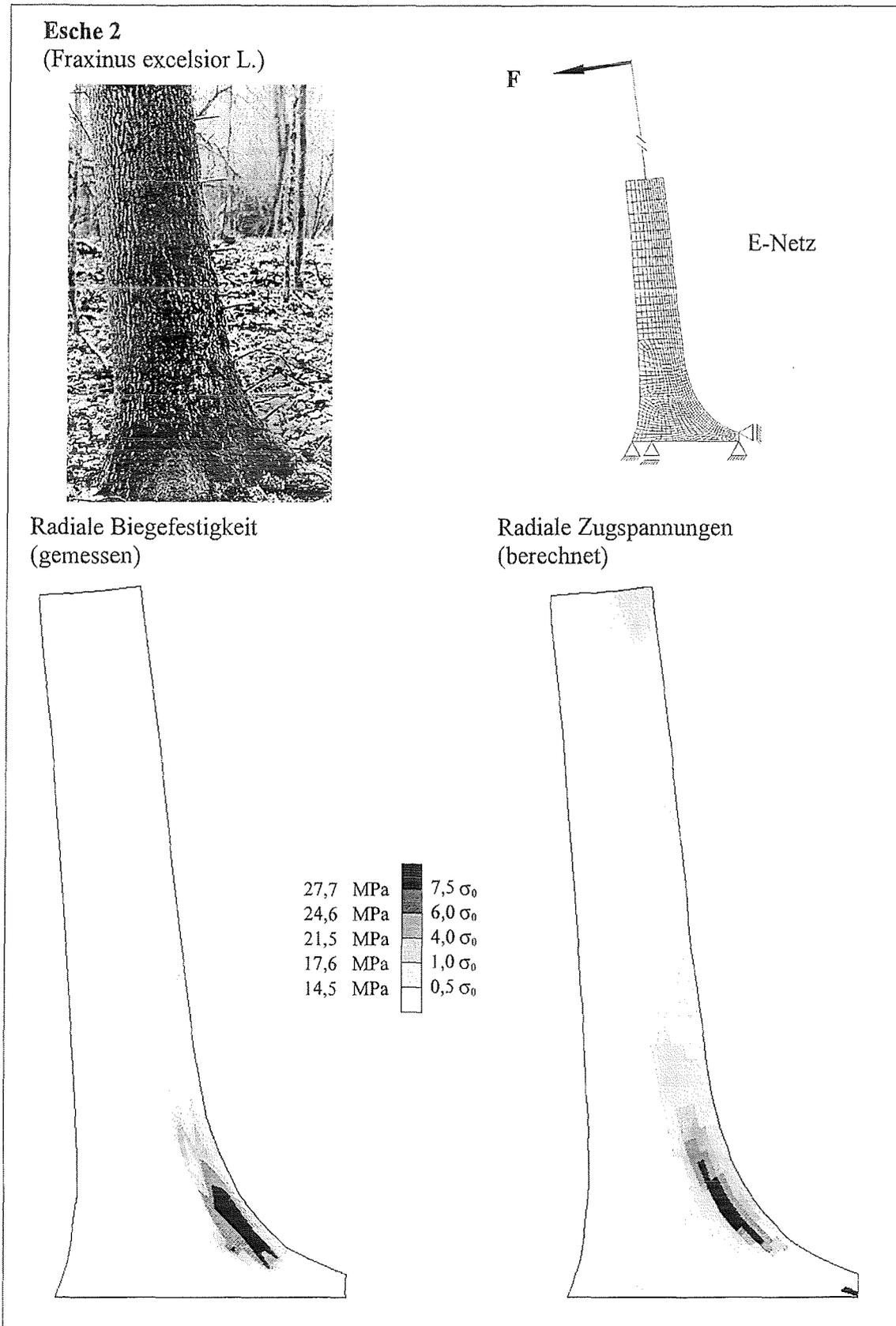
Radiale Zugspannungen
(berechnet)



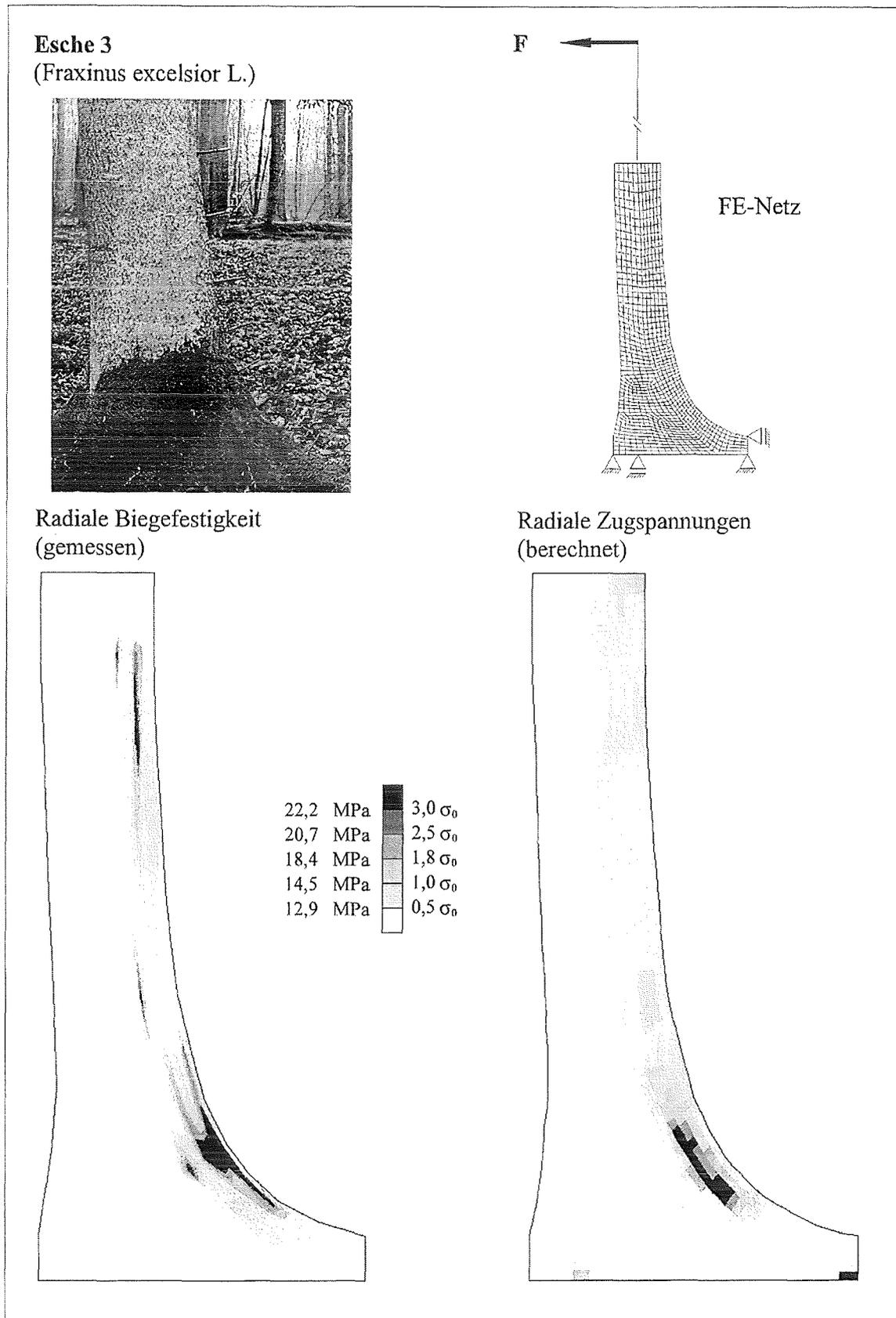
Tafel 18: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



Tafel 19: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (dunkle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).

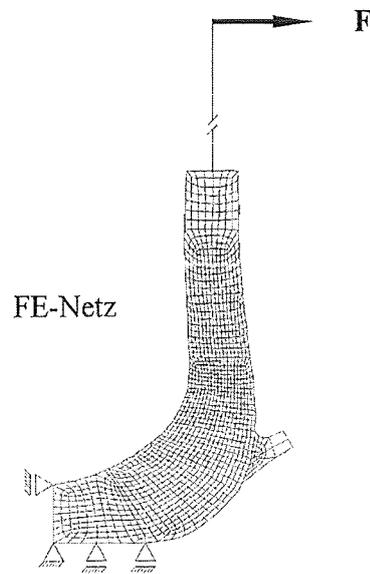


Tafel 20: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (dunkle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



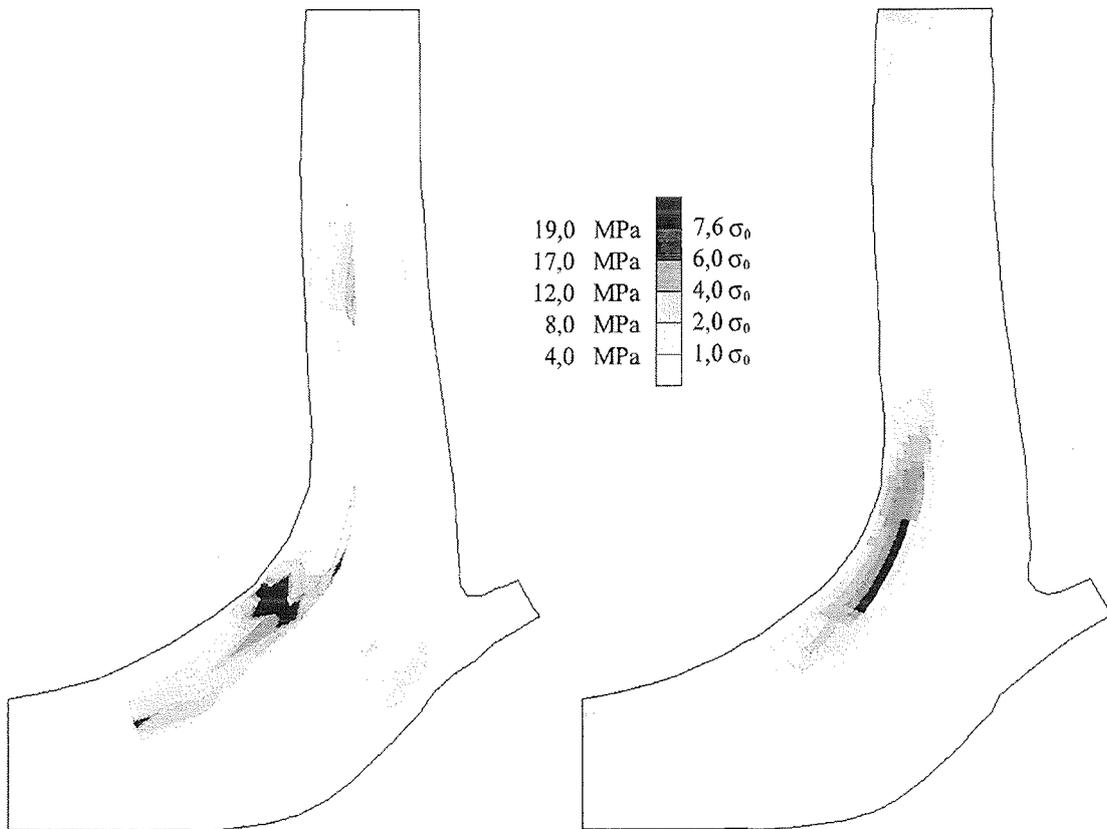
Tafel 21: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (dunkle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).

Esche 4
(*Fraxinus excelsior* L.)

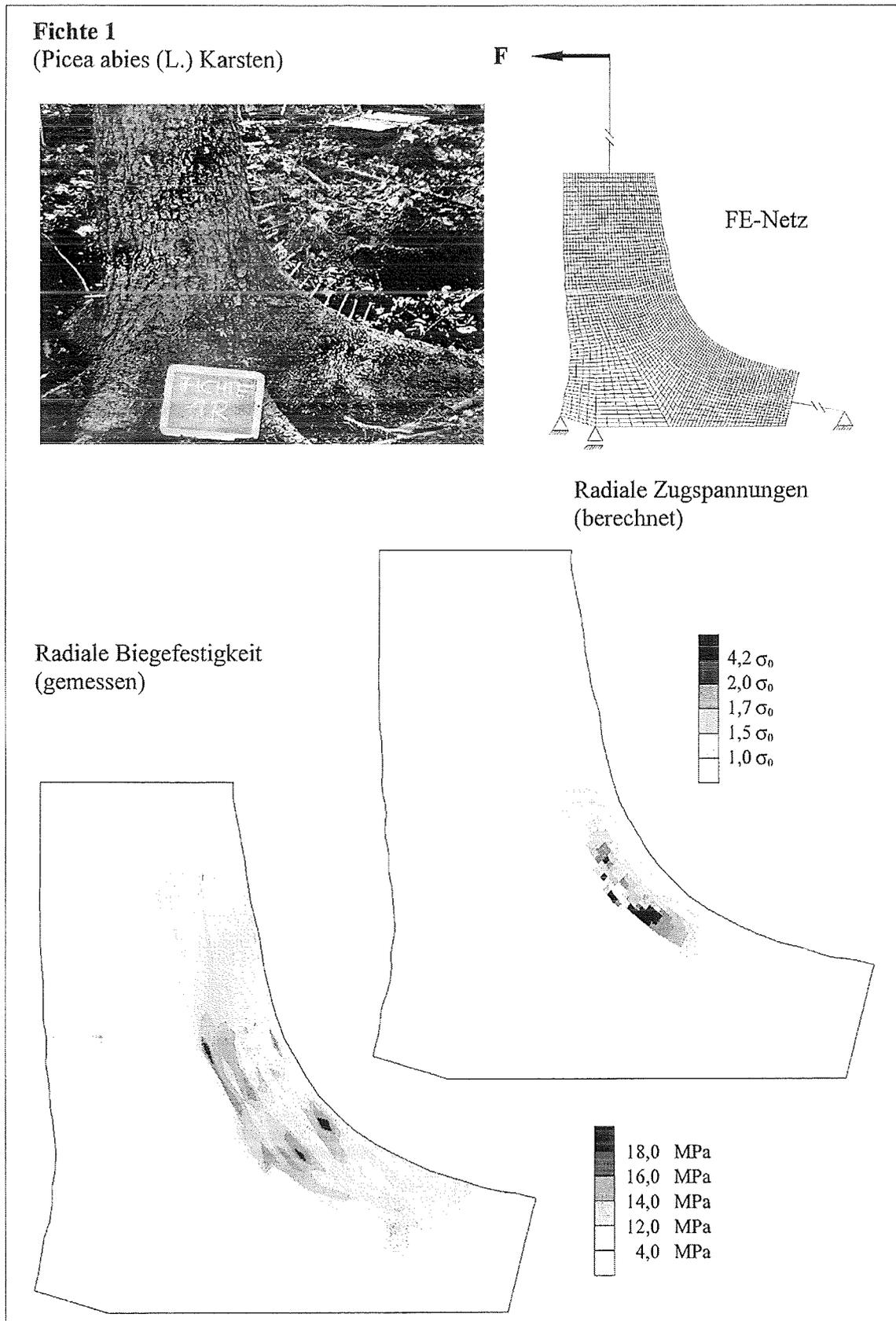


Radiale Biegefestigkeit
(gemessen)

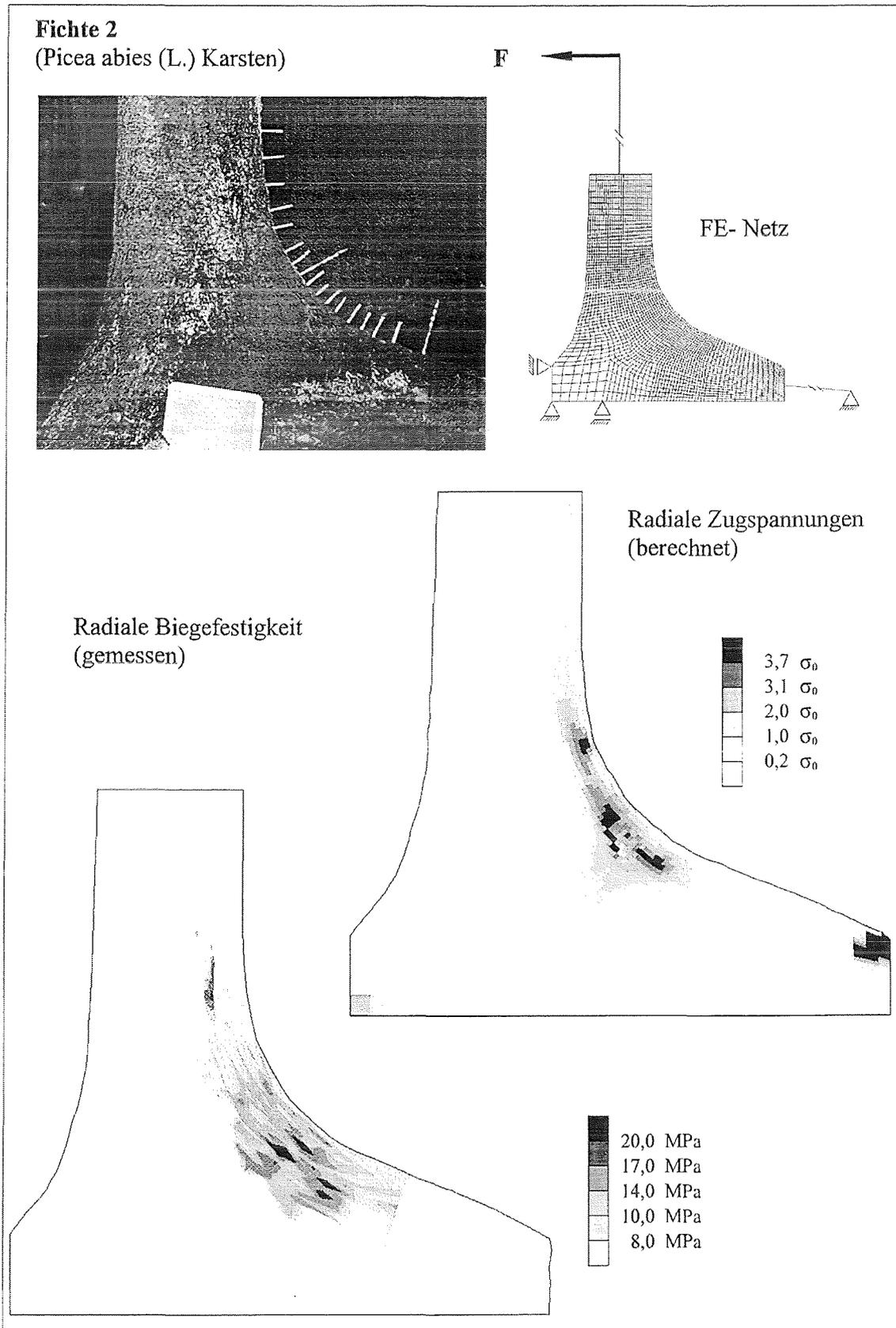
Radiale Zugspannungen
(berechnet)



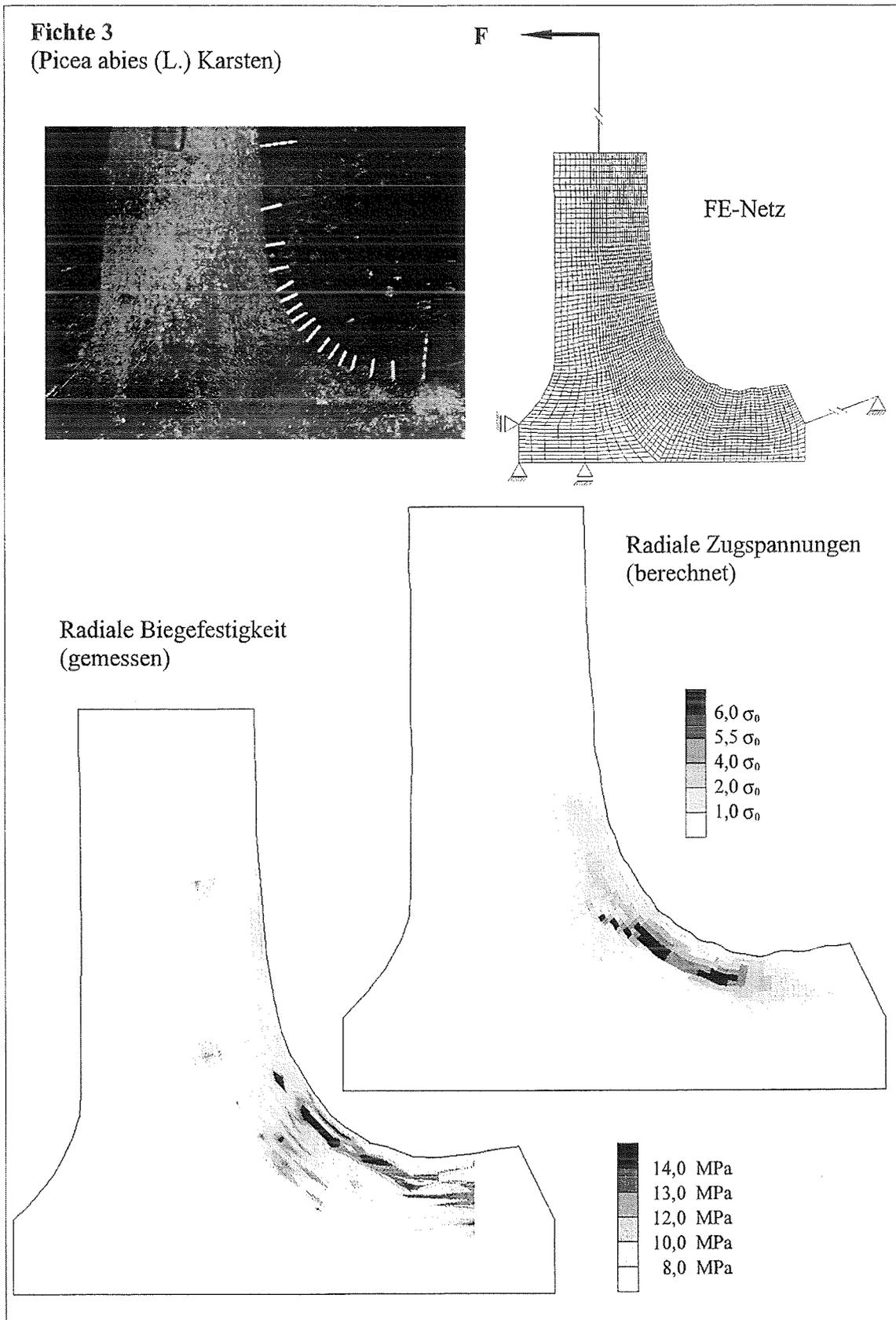
Tafel 22: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



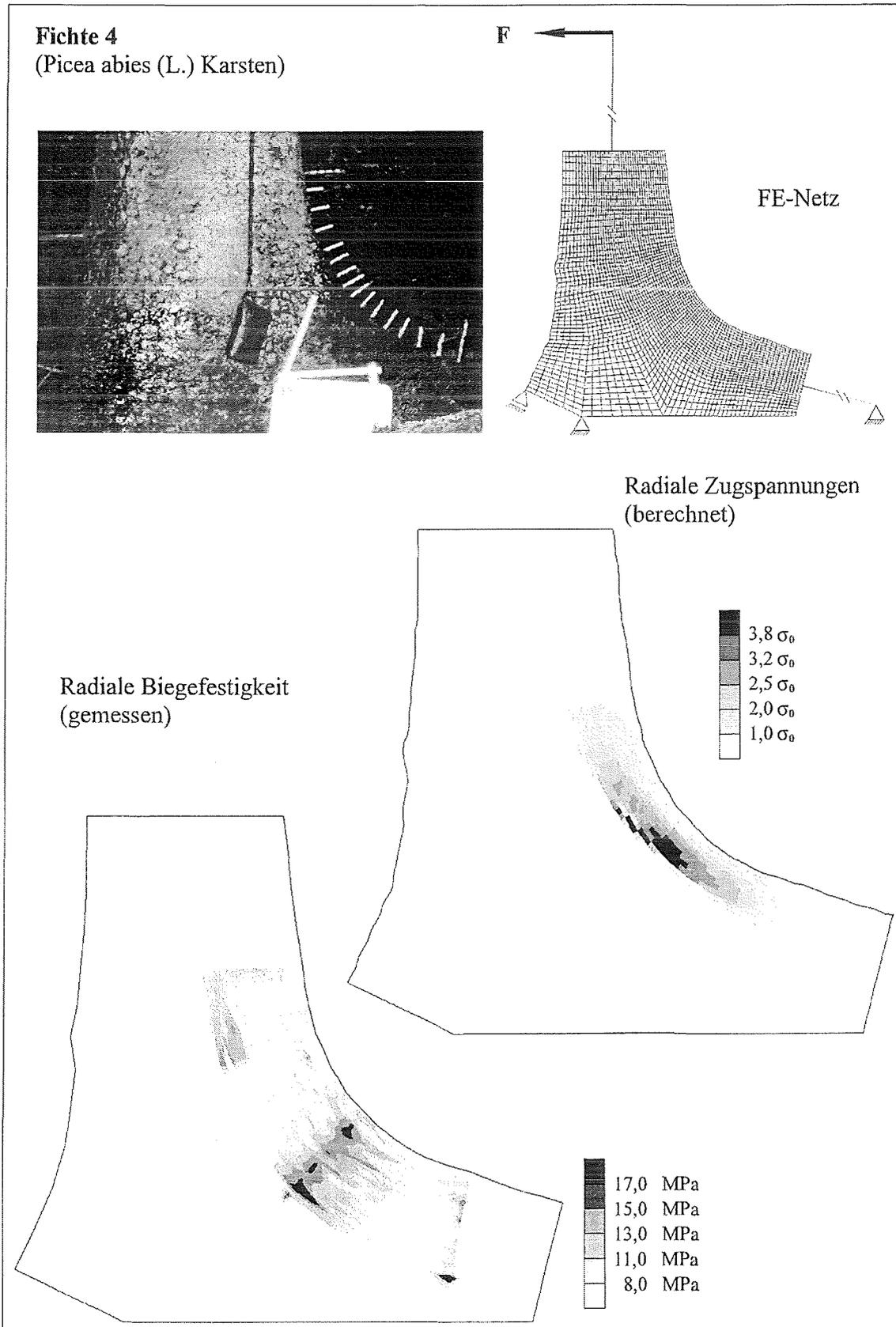
Tafel 23: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



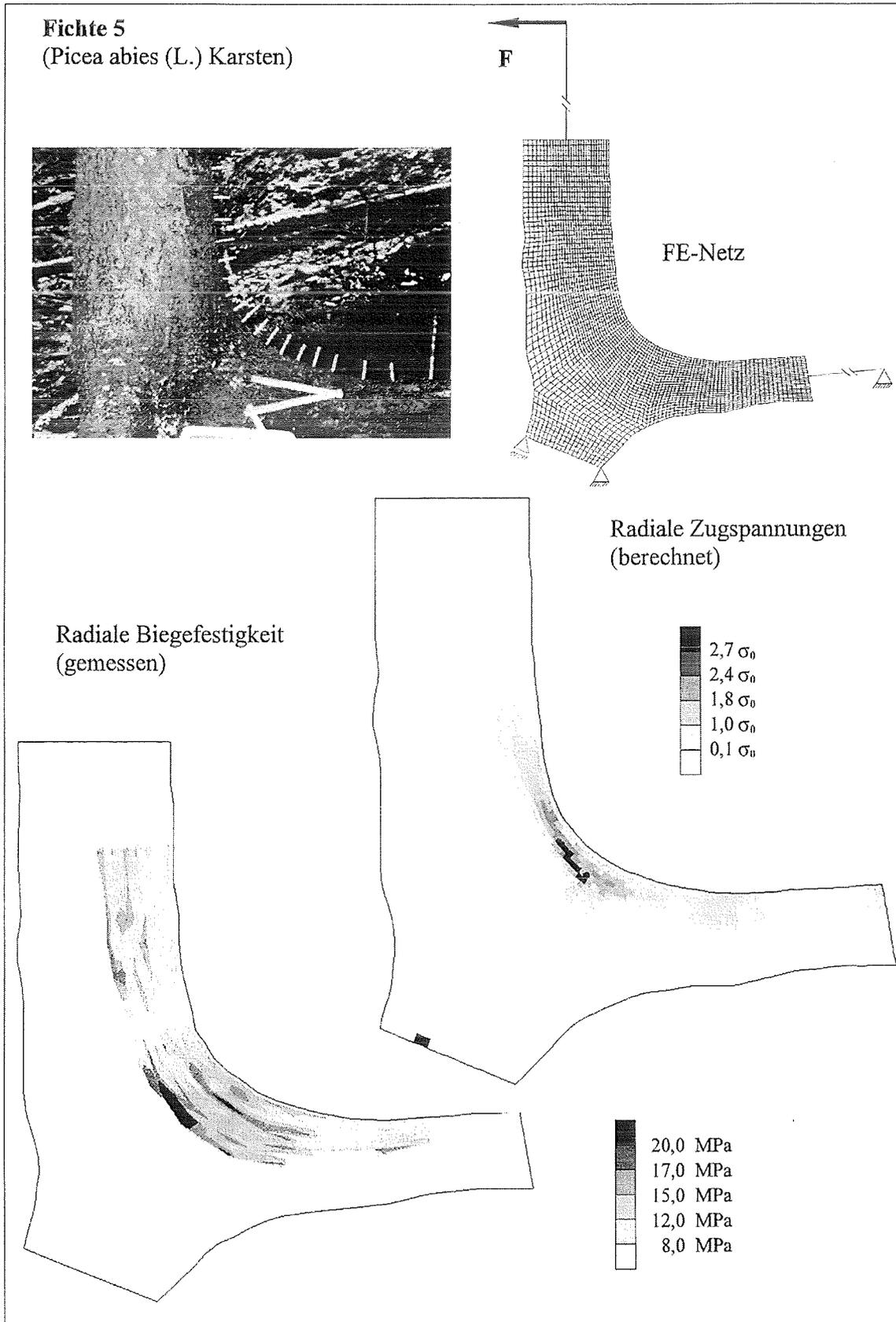
Tafel 24: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



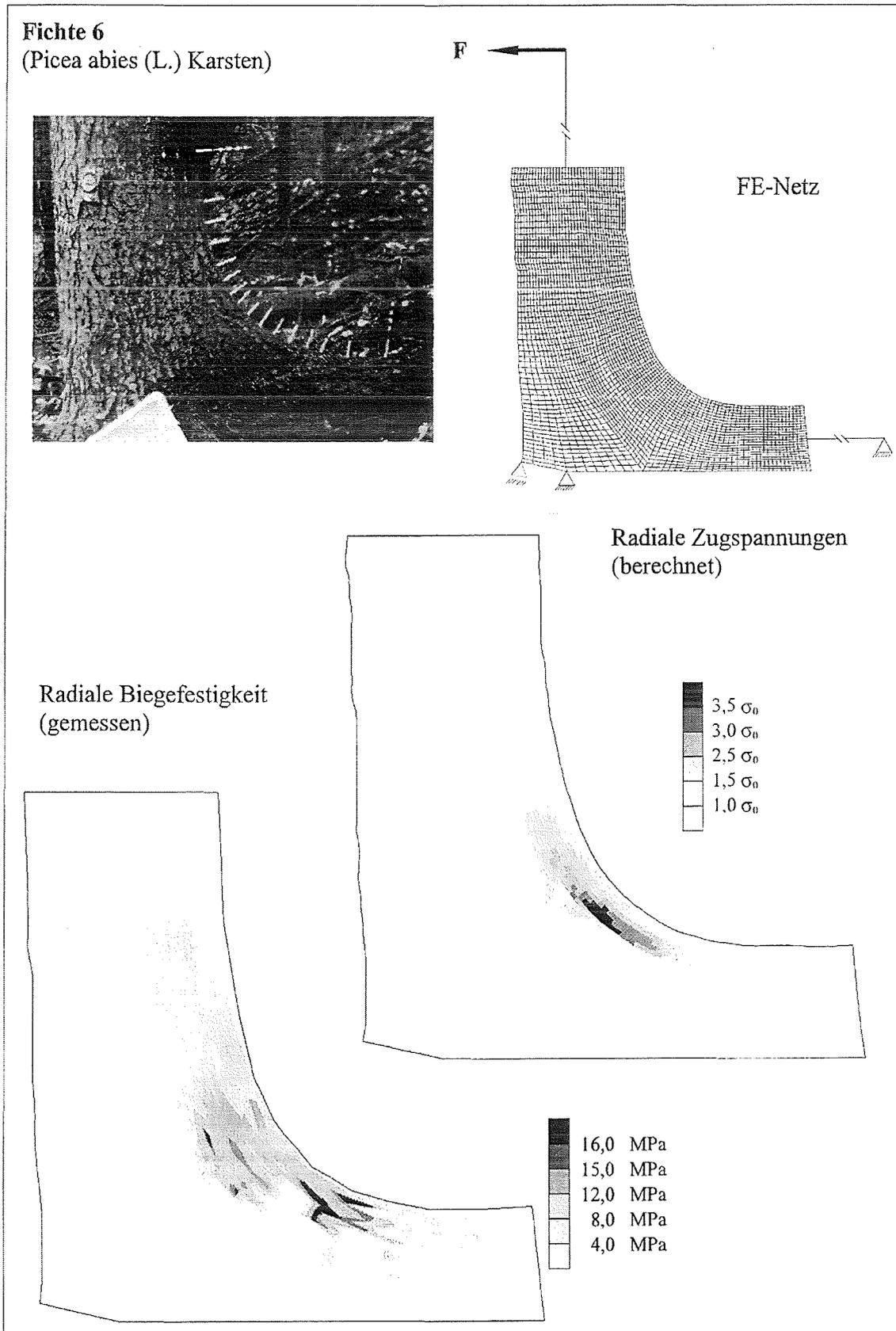
Tafel 25: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



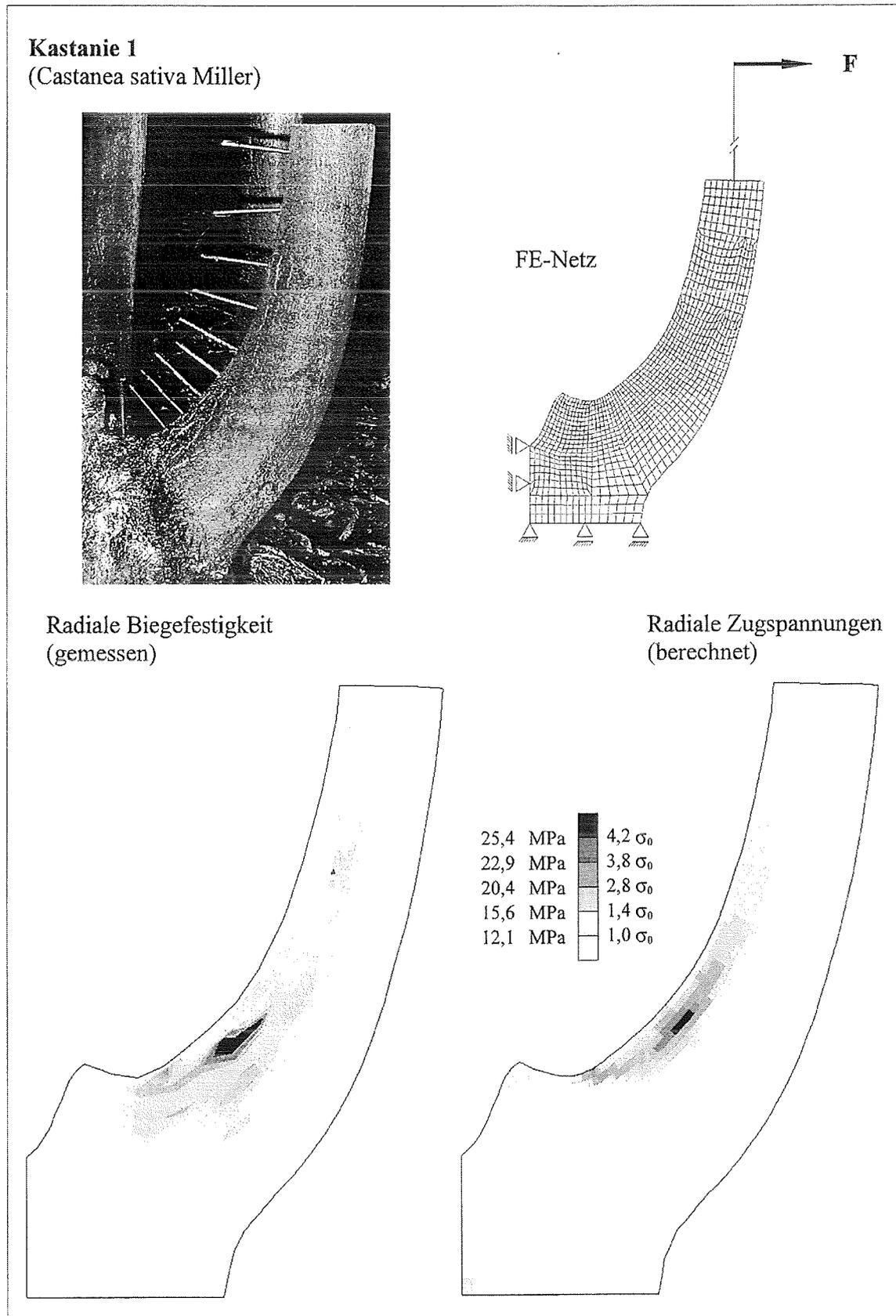
Tafel 26: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



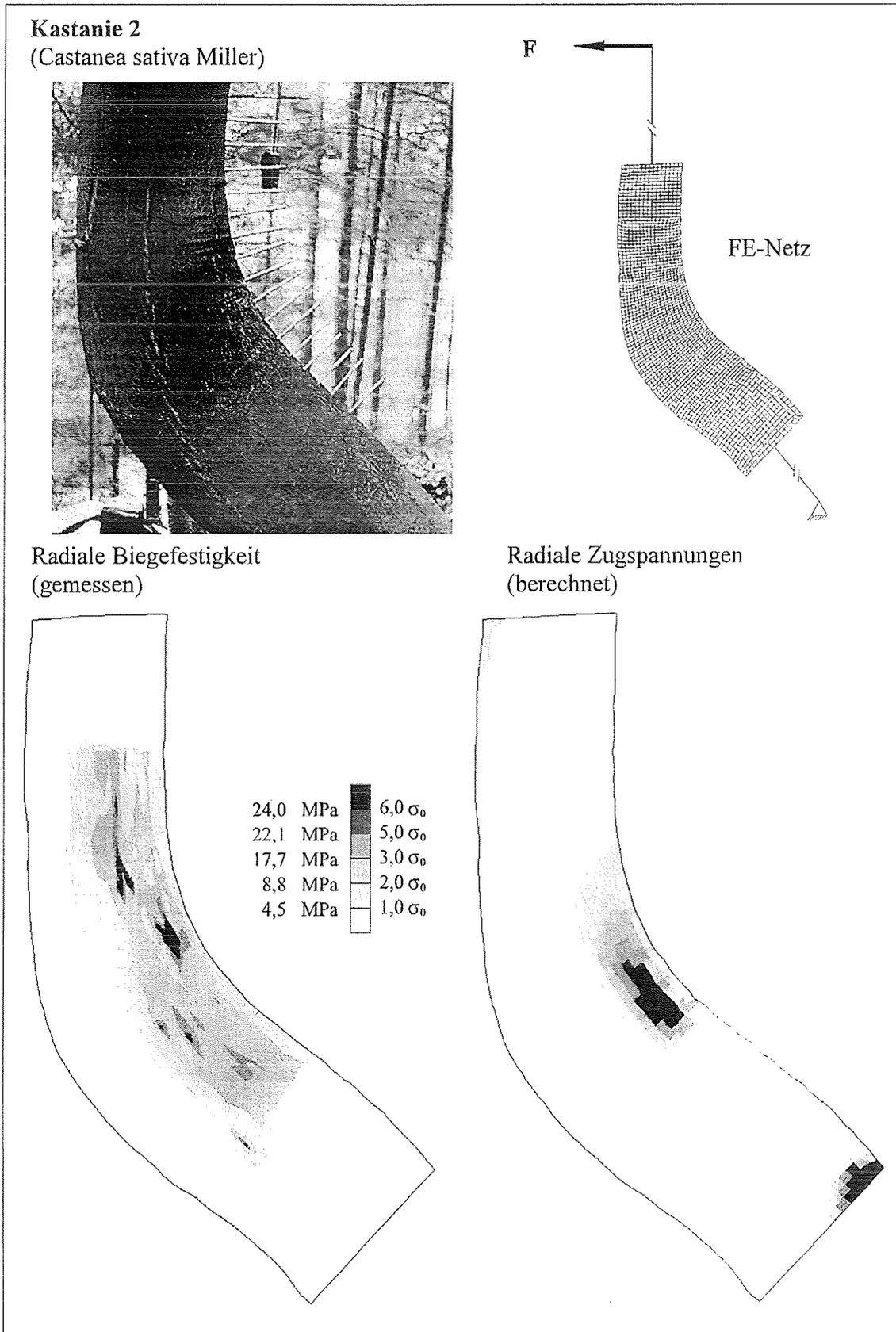
Tafel 27: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (weiße Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



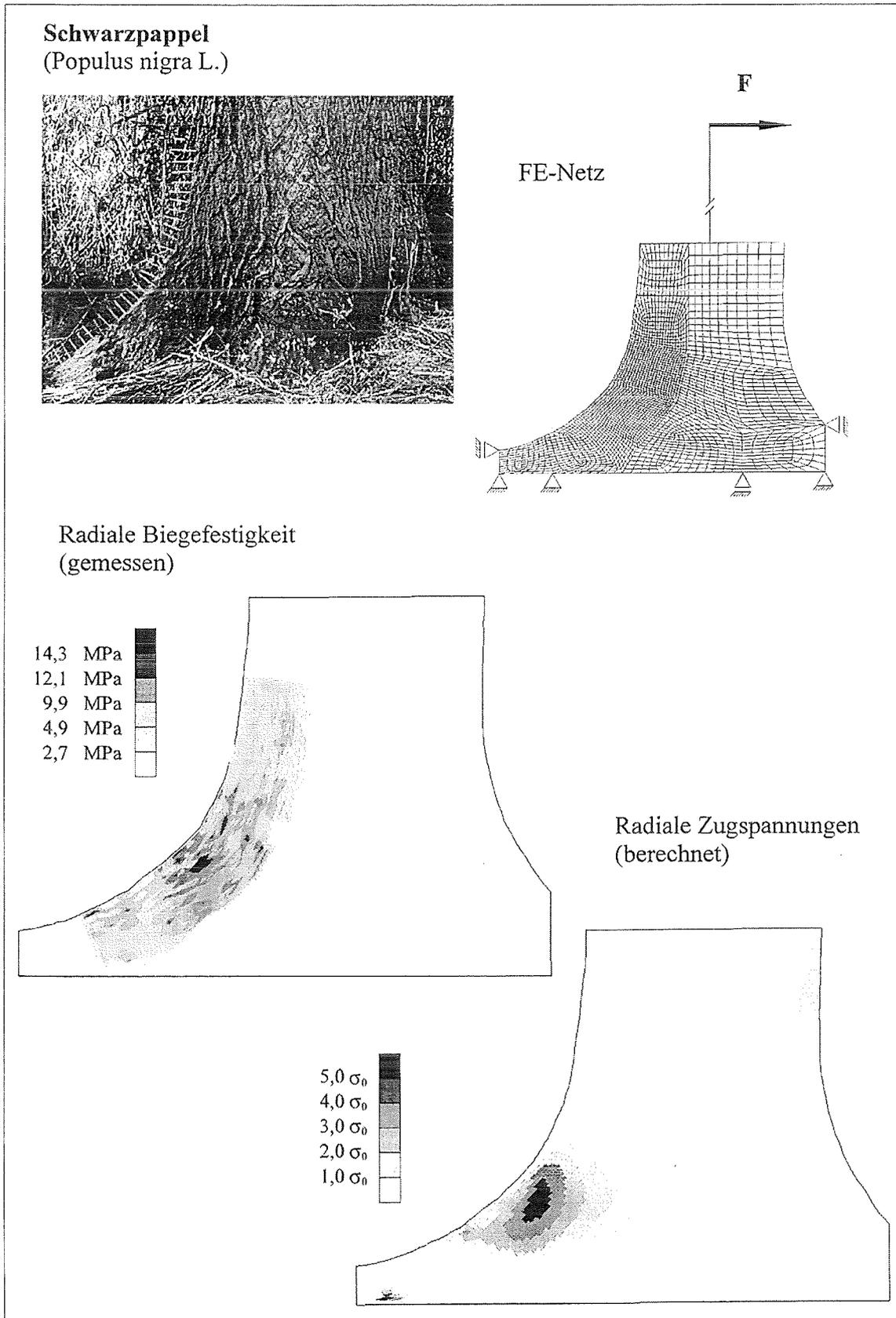
Tafel 28: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



Tafel 29: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



Tafel 30: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).



Tafel 31: *Oben:* Seitenansicht mit Bohrkernentnahmestellen (helle Stifte) sowie FE-Netz zur Spannungsberechnung mit Randbedingungen.
Unten: Radiale Biegefestigkeitsverteilung (links) und Zugspannungsverteilung senkrecht zum Faserverlauf (rechts).

Das Diagramm in Abbildung 27 zeigt nochmals anschaulich die Querfestigkeitszunahme des Holzes aus dem Unglücksbalkenbereich gegenüber dem geraden Stammabschnitt. Dem Diagramm liegen die Werte von insgesamt 64 Laub- und Nadelbäumen zugrunde. Es wurden jeweils die mittleren Querfestigkeiten der oberen zwei Bohrproben (σ_{GS}) auf den gemittelten Bruchspannungswert (σ_K) zweier Bohrkerne bezogen, die durch das gemessene radiale Festigkeitsmaximum verliefen.

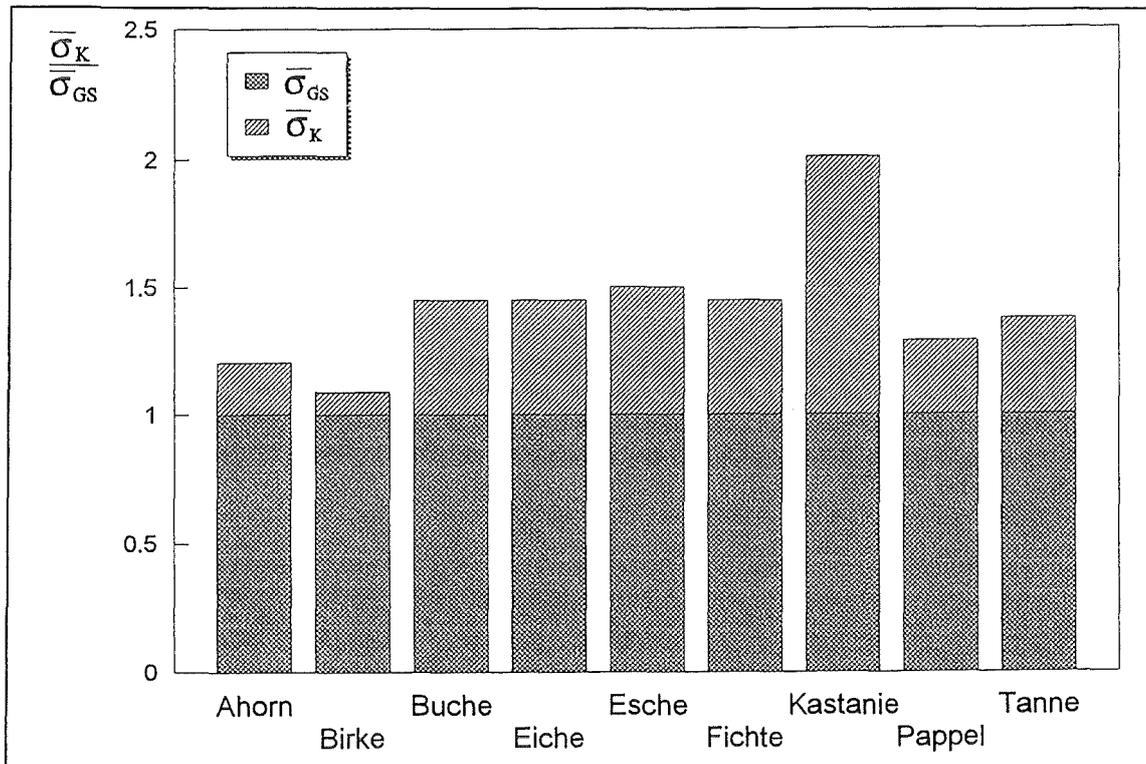


Abbildung 27: Vergleich der mittleren radialen Querbiegefestigkeit der oberen zwei Bohrkerne (gerader Stammbereich, σ_{GS}) mit denjenigen zwei Bohrproben, die durch das lokale Festigkeitsmaximum im Krümmungsbereich verliefen (σ_K).

In den Tafeln 1 bis 31 werden die gemessenen Festigkeitsverteilungen mit den berechneten Radialspannungsverteilungen rein qualitativ verglichen. Der Zusammenhang zwischen querzugbelasteten Baumbereichen und deren radialer Biegefestigkeitsverteilung wird in Abbildung 28 nochmals quantitativ verdeutlicht.

Es wurden dabei diejenigen Biegefestigkeitswerte betrachtet, die bereits zur Erstellung der Graustufenskalen in den Darstellungen der Biegebruchfestigkeitsverteilungen zugrunde lagen. Bei den Querzugspannungen wurden ebenfalls diejenigen Werte betrachtet, die zur Festlegung für die Schrittweiten der Graustufungen herangezogen wurden. Hierdurch wurde erreicht, daß Gebiete gleicher Festigkeiten mit den entsprechenden Querzugspannungsbereichen des FE-Modells verglichen werden.

Aufgrund der gemachten Beobachtungen läßt sich ein linearer Zusammenhang von Belastung des Holzverbundes durch Querzugspannungen und dessen radialer Biegefestigkeit herstellen. Mit steigender Querzugbelastung erhöht der Baum die radiale Biegefestigkeit seines Holzes. Dieser Zusammenhang zwischen Festigkeit und Belastung läßt

sich bei allen betrachteten Strukturen, ob Wurzelanlauf, gekrümmter Stamm oder Ast sowie den unterschiedlichen Baumarten, gleichermaßen feststellen.

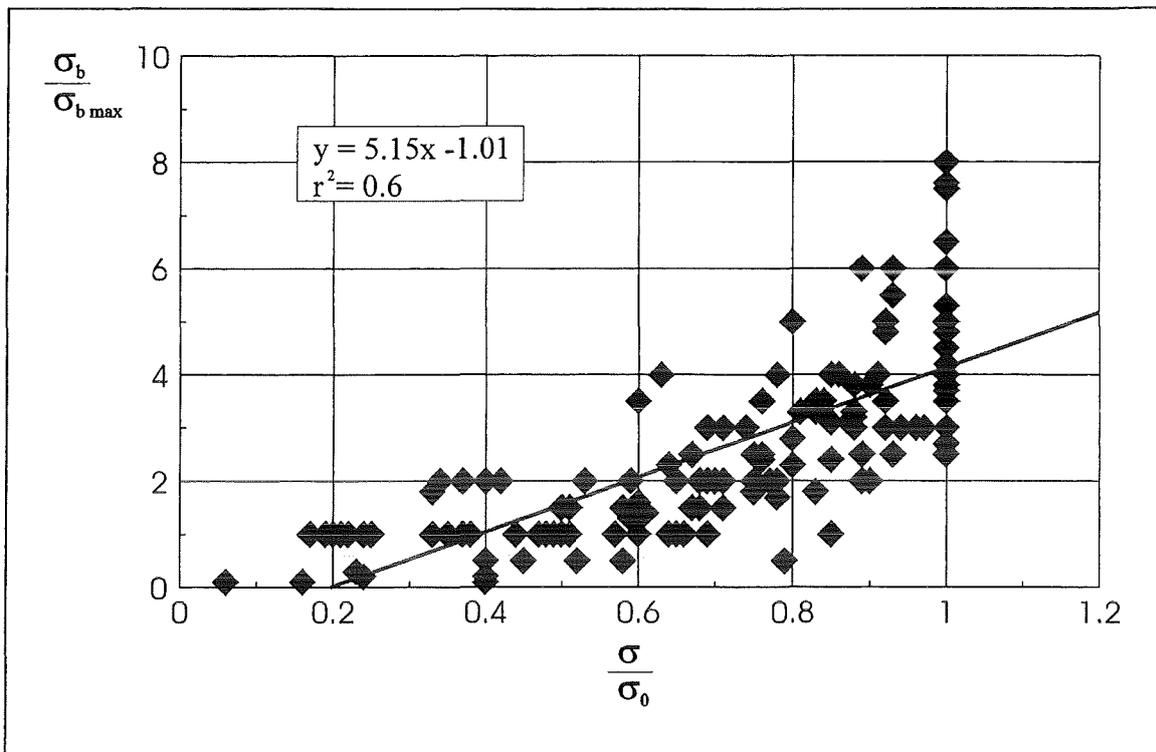


Abbildung 28: Beziehung zwischen den gemessenen radialen Biegefestigkeiten (σ_b) bezogen auf den jeweils höchsten dargestellten Wert ($\sigma_{b \max}$) und den für das FE-Modell berechneten Querspannungen (σ) bezogen auf eine mittlere Querspannung (σ_0) im weitgehend geraden Modellbereich.

6.3. Festigkeitsverteilung im Bohrkern

Um einen Einblick zu erhalten, wie sich die Festigkeiten in Bohrkernen, die durch das gemessene Festigkeitsmaximum gehen, im Mittel verteilen und welches Aussehen der Kurvenverlauf der Biegefestigkeitswerte im Bereich des Maximum hat, wurden diese wie folgt beschrieben untersucht. Diese gesonderte Betrachtung sollte zusätzliche Informationen darüber liefern, welche Forderungen an einen Optimierungsmechanismus zur Festigkeitsverteilung zu stellen sind bzw., ob ein reiner Anlagerungs- und Materialanbauprozess für die Festigkeitsverteilung verantwortlich sein kann.

Zum Erstellen der Kurve in Abbildung 29 wurden speziell diejenigen Bohrkern betrachtet und miteinander verglichen, die aus dem Bereich der größten Krümmung entnommen wurden und den höchsten radialen Biegefestigkeitswert enthielten. Zunächst wurden die Festigkeitswerte rechts und links des lokalen Maximalwertes auf diesen höchsten Biegefestigkeitswert (σ_{\max}) normiert. Da ungleiche Baumstrukturen unterschiedlichster Durchmesser und Außenkonturen wie Wurzelanläufe, gekrümmte Äste sowie Stämme etc. im gleichen Diagramm betrachtet werden sollen, der Ort des lokalen Biegefestigkeitshöchstwertes sich aber allein nach Radius bzw. Form des Baumes richtet, mußte für alle Bohrkern zunächst ein Bezugspunkt geschaffen werden.

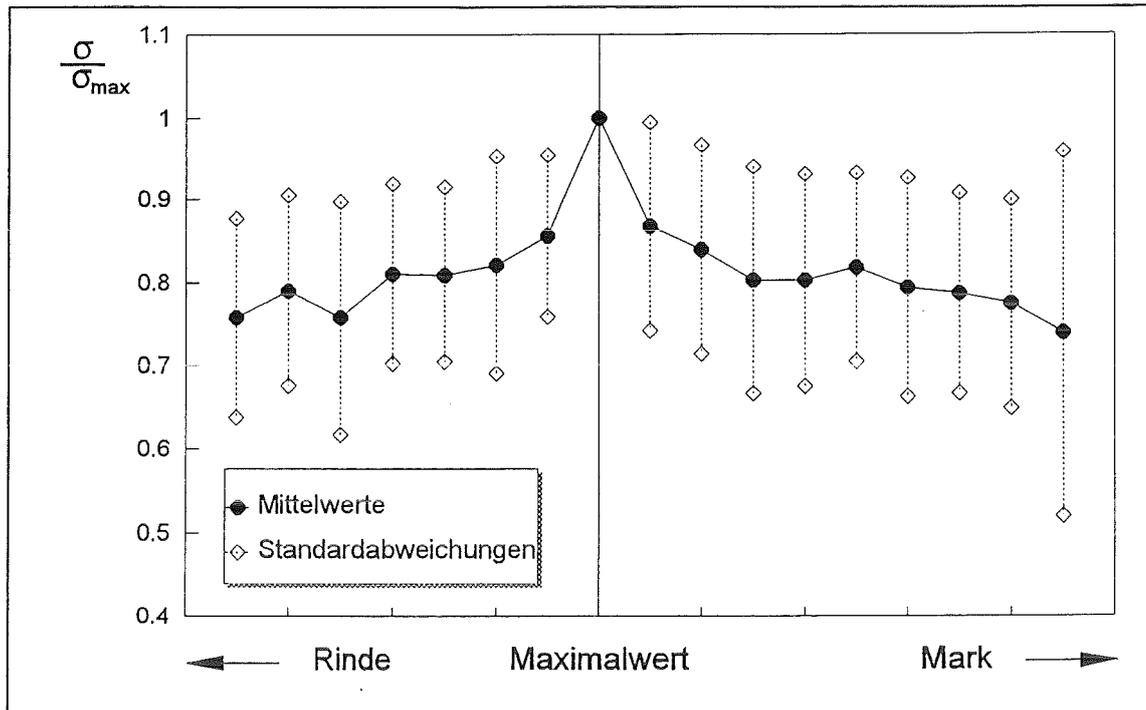


Abbildung 29: Festigkeitsverteilung entlang derjenigen Bohrkernpositionen, die durch die lokalen Festigkeitsmaxima der untersuchten Bäume verliefen.

Je nach untersuchter Struktur und Stammdurchmesser befindet sich das Festigkeitsmaximum nämlich mehr oder weniger weit von der Rinde entfernt. Das allen Bohrproben aus diesem Bereich gemeinsame Festigkeitsmaximum wurde als Bezugspunkt für jeden dieser Bohrkernpositionen ausgewählt. Die einzelnen Festigkeitskurven werden mit dem ihnen gemeinsamen lokalen Maximum auf den Abszissennullpunkt ausgerichtet. Somit liegen die Bruchspannungswerte rechts (in Richtung Mark) und links (in Richtung Rinde) des lokalen Höchstwertes, mit ihren durch das Fractometer vorgegebenen Bruchabständen exakt übereinander. Durch diese Maßnahme werden immer nur Festigkeitswerte miteinander verglichen, die 11, 22, 33 mm usw. vom Höchstwert entfernt liegen. Aus diesen übereinanderliegenden Werten werden die arithmetischen Mittel berechnet und zusammen mit ihrer Standardabweichung¹⁹ in das Diagramm eingetragen. Dem Diagramm liegen die Meßwerte von 58 Laub- und 13 Nadelbäumen zugrunde.

Die Kurve ist gekennzeichnet durch einen steilen Anstieg sowie Abfall der Festigkeitswerte links und rechts des Maximalwertes. Die Festigkeitswerte vor und nach dem Höchstwert unterscheiden sich in ihrer Höhe nur wenig. Das Niveau der Biegefestigkeitswerte rechts vom jeweiligen Maximalwert (markseitig) liegt im allgemeinen nur wenig höher als die rindenseitig gemessenen Festigkeiten. Wegen der großen Streubreite der Holzfestigkeitswerte ist jedoch eine größere Probenanzahl notwendig, um eine abschließende Aussage über einen eventuell existierenden Unterschied zu machen.

¹⁹ Holzfestigkeiten (Zug und Druck) zeigen typische Normalverteilungskurven (KOLLMANN 1951). Untersuchungen von TESARI (1995) über die, mit einem Fractometer gemessenen, radialen Biegefestigkeiten ergaben ebenfalls typische Normalverteilungskurven für diesen Wert. Mittelwertbildung und Standardabweichung beziehen sich auf diese Verteilung.

Je größer der Abstand zur Nullmarke im Diagramm gewählt wird, desto geringer wird die Anzahl der Meßdaten auf die sich der eingetragene Mittelwert stützt. Dies hat im wesentlichen folgenden Grund: bei Bäumen mit großen Stammdurchmessern wurde der höchste Festigkeitswert erst nach ca. 8 bis 10 Fractometerbrüchen erreicht, bei entsprechend dünneren Exemplaren war dies aber schon nach 3 oder 4 Brüchen der Fall. Ähnliches gilt für den Bereich vom Maximalwert zum Stamminneren hin. Bei Stämmen mit großem Umfang konnten bis zum Erreichen des Markes wesentlich mehr Fractometermessungen durchgeführt werden, als dies bei Bäumen mit schwächerem Durchmesser möglich war.

6.4. Das Maximum wandert

Bäume ändern durch Wachstum während ihres gesamten Lebens ständig ihr äußeres Erscheinungsbild. Während das sekundäre Dickenwachstum ein immer fortlaufender Prozeß ist, wird nach STRASBURGER (1991) das Höhenwachstum nach einigen Jahren/ Jahrzehnten eingestellt. Die nachfolgende Computersimulation setzt zu diesem Zeitpunkt ein.



Abbildung 30: Brettwurzelbildung an einer Eiche

Der in Abbildung 30 gezeigte Stammfuß einer ausgewachsenen Eiche diente als Vorbild für die Belastungs- und Lagerungssituation des weiter unten besprochenen FE-Modells. Der Baum steht auf feuchtem, relativ weichem Untergrund. Bei vorwiegender Windbelastung aus Westen (Ober rheinebene bei Karlsruhe) können nur die Druckkräfte auf der rechten Stammseite direkt in den Boden eingeleitet werden. Der linke Wurzelstrang besitzt in einigem Abstand zur Stammachse Sinkerwurzeln. Die Kräfte auf der Zugseite der Biegung können erst durch diese stammfern in den Boden eingeleitet werden.

Anhand eines auf zwei Dimensionen beschränkten, einfachen Baummodells soll mit CAO²⁰ das sekundäre Dickenwachstum simuliert werden.

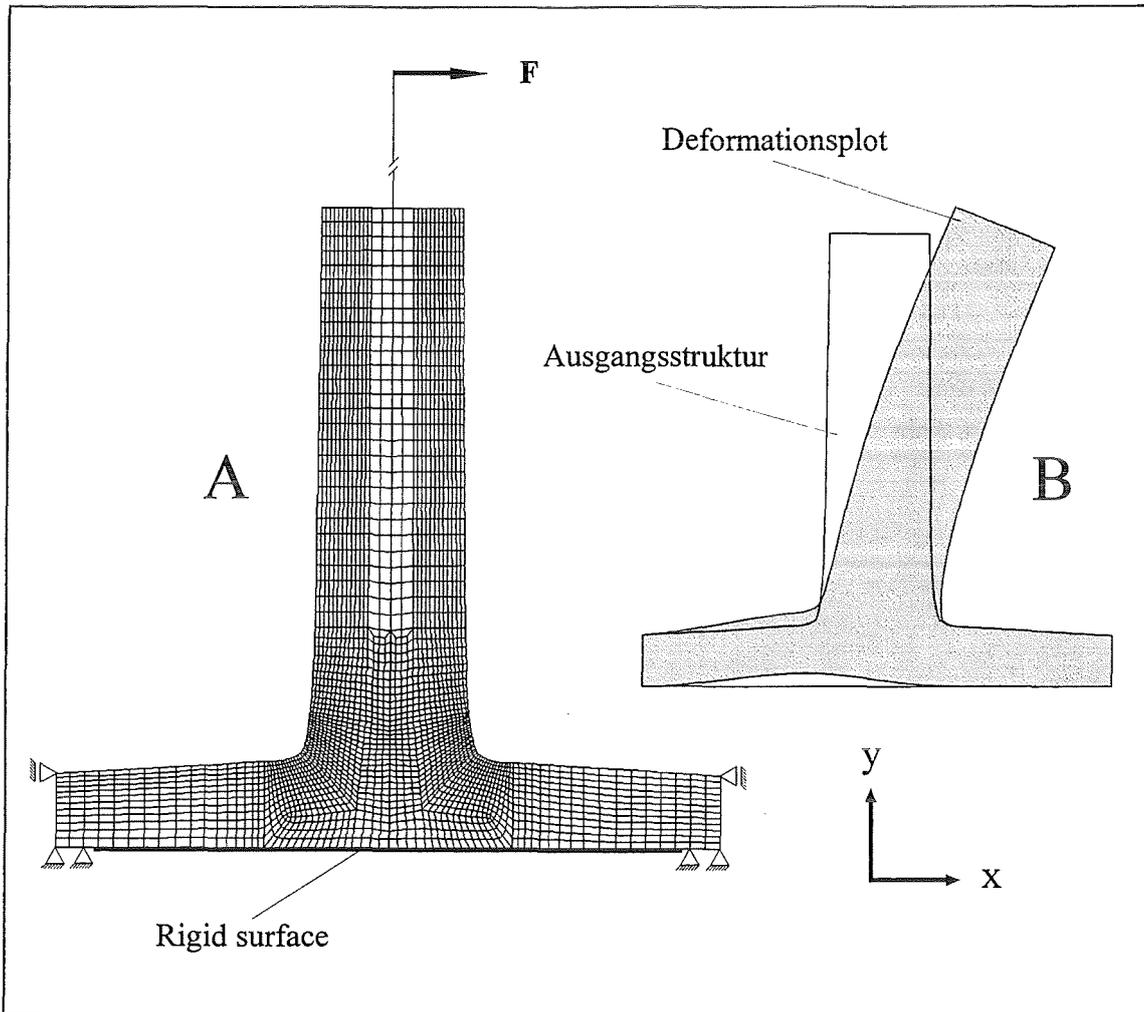


Abbildung 31: FEM-Modell mit Einspannungen und Belastung für die CAO-Wachstumschritte (A). Außenkontur der Ausgangsstruktur mit darübergeplotteter Verformungsfigur (grau) (B). Die Verformung ist 50fach überhöht dargestellt.

Ausgangspunkt ist das in Abbildung 31 dargestellte FE-Modell mit bereits kerbspannungsfreien Übergängen von Stamm zu den Wurzeln. Das Wurzelsystem wurde als Sinkerwurzelsystem mit stammfernen Sinkerwurzeln, wie es von einigen Laub- und Nadelbäumen gebildet wird, nachmodelliert. Wie bereits in Kapitel 4.2 und bei MATTHECK & PRINZ (1991) erwähnt, bilden diese Wurzelsysteme durch die enorme Umlenkung, die der Kraftfluß auf der dem Wind zugewandten Seite erfährt, vorwiegend Brettwurzeln aus.

In Kapitel 6.1 wurde gezeigt, daß gekrümmte Träger, werden sie aufgebogen oder begradigt, im Innern durch Querzugspannungen belastet werden. Die Frage, welchen Einfluß Dickenwachstum in Form von Durchmessererhöhung des Stammes insbesondere im Wurzelanlauf auf diese Querzugspannungsverteilung hat, soll nachstehend erörtert werden.

²⁰ In diesem Fall wird nur die Option "wachsen" zugelassen, d.h. auch wenn sich im Laufe der Berechnung unterbelastete Bereiche ergaben, wurde dort kein Material entfernt.

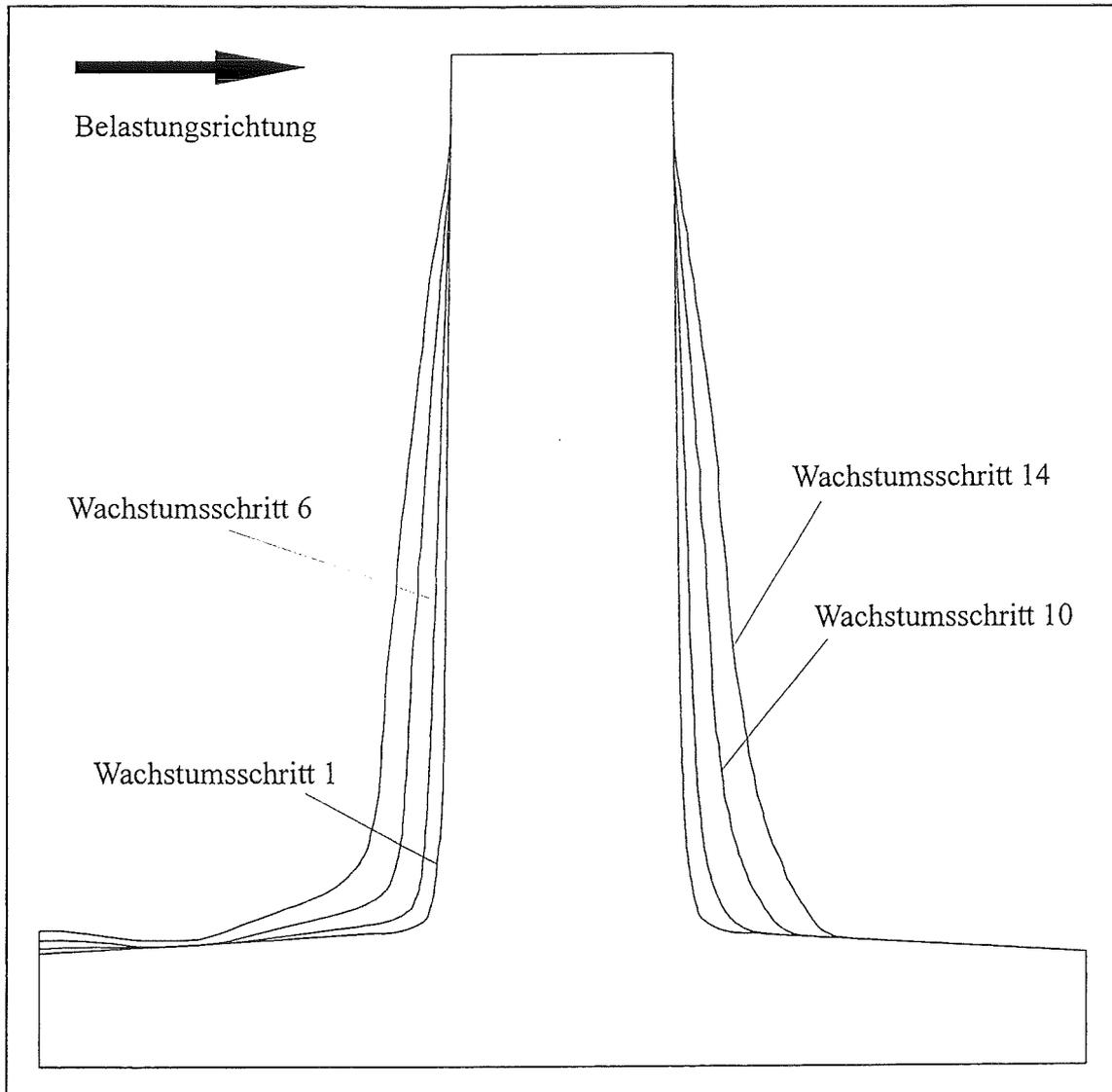


Abbildung 32: Vergleich der Außenkonturen der vier ausgewählten CAO-Wachstumsschritte.

Die Unterseite des Modells stützte sich auf einer *Rigid-surface* (HIBBIT *et al.* 1987) ab. Es konnten hierdurch lediglich Druckkräfte in y-Richtung übertragen werden. Als Reibungskoeffizient μ , zwischen Modellunterseite und *Rigid-surface*, wurde 1 gewählt, um die nicht selten formschlüssige Verbindung von Wurzeln und Erde zu simulieren. Die Übertragung von Zugkräften war nur über die zweiwertigen Lager an den stammfernen Wurzelenden möglich. Die Einleitung des Biegemomentes in den fein diskretisierten Stamm- und Wurzelbereich wurde mit *Beam-Elementen* realisiert, wie sie auch bei den FE-Modellen in Kapitel 6.2 verwendet wurden. Der Betrag der Querkraft sowie Geometrie des Angriffspunktes war bei allen CAO-Zyklen gleich.

Der Werkstoff wurde für die Wachstumszyklen zunächst isotrop angenommen und linear elastisches Verhalten zugrunde gelegt - eine Annahme die durch die geringen Unterschiede in den Spannungsverteilungen der Abbildung 26 etwas gerechtfertigt wird. Die Diskretisierung wurde mit 4-Knotenpunktselementen für den ebenen Verzerrungszustand vorgenommen. Als Referenzspannung (σ_{Ref}) wurde der von Mises-Spannungswert eines Knotens gewählt, der im oberen Stammbereich unter der Oberfläche lag. Somit war ge-

währleistet, daß "CAO nie mit dem Spannungszustand auf der Modelloberfläche zufrieden sein konnte", obwohl die geforderte Spannungskonstanz auf der Oberfläche bereits im Ausgangsmodell weitestgehend erreicht war. Die durch den Referenzknoten geforderte Spannungshöhe lag immer etwas unter der auf der Oberfläche Erreichbaren. Damit wurde ein Dickenwachstum erzwungen, was Bäume auch aus biologischen Gründen (Verkernung des Splintholzes) vollziehen müssen.

Insgesamt wurden 14 CAO-Wachstumszyklen durchlaufen. Die Wachstumsschritte 1, 6, 10 und 14 wurden ausgewählt und mit Hilfe des CAIO-Verfahrens und den Kennwerten für grünes Buchenholz die Materialorientierungen nach jedem Dickenzuwachs so gewählt, daß wieder ein weitgehend schubspannungsfreies Modell entstand. Diese vier Wachstumsschritte sollen im folgenden einer näheren Betrachtung unterzogen werden. Abbildung 32 zeigt die Außenkonturen der 4 ausgewählten Wachstumsschritte im Vergleich.

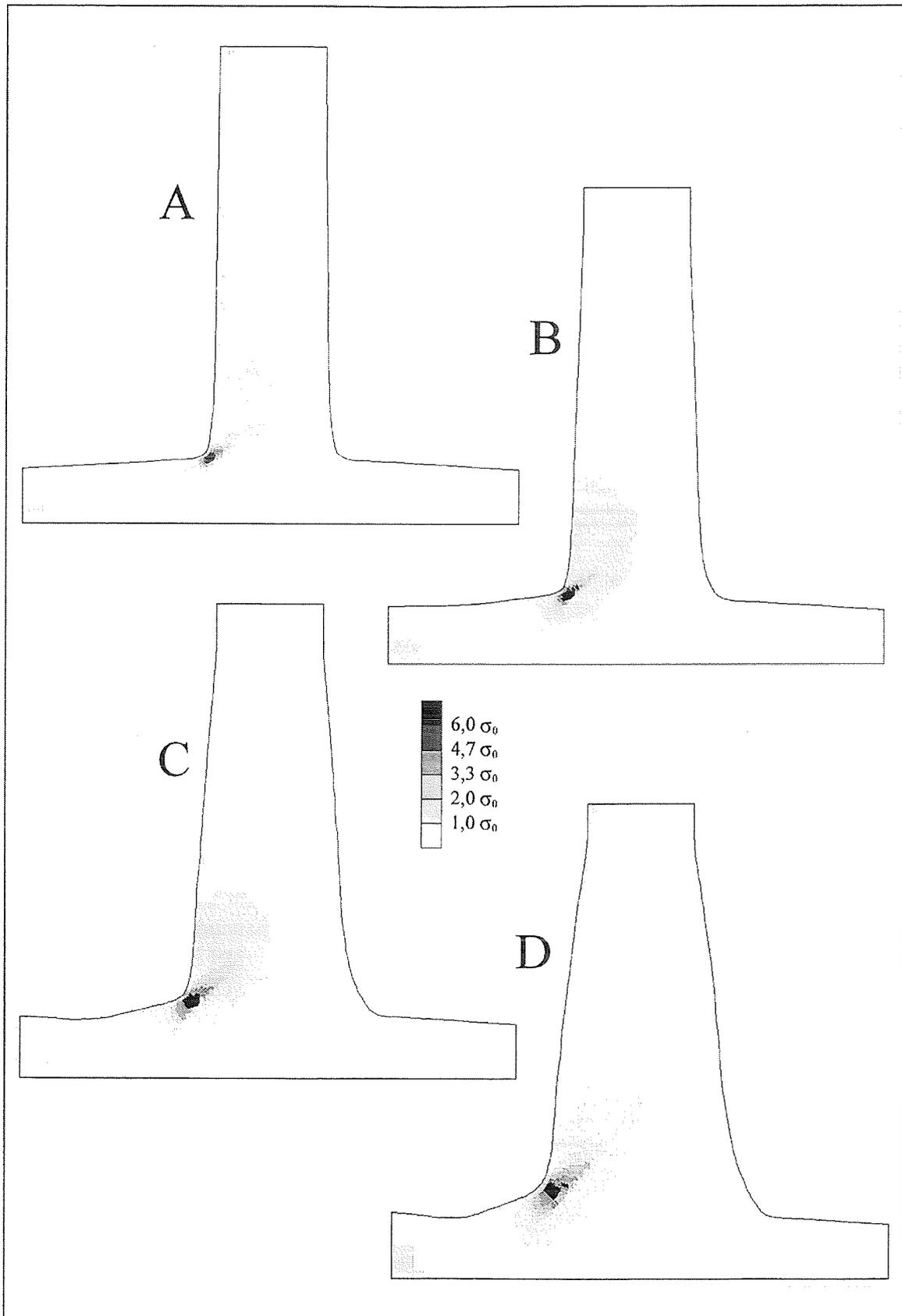
Mit zunehmendem "Alter" des Baummodells wird die Ausbildung einer Brettwurzel auf der linken Seite immer deutlicher²¹. Diese Seite unterscheidet sich von der Kontur, die sich im rechten Wurzelanlauf ausbildet. Dies ist auf die spezielle Lagerung des Modells zurückzuführen. Können die, durch die Querkraftbiegung hervorgerufenen, Längsdruckspannungen noch stammnah übertragen werden (geringe Kraftflußumlenkung), erfährt der Kraftfluß auf der Zugseite der Biegung eine starke Umlenkung, da dieser erst stammfern in die zweiwertigen Lager eingeleitet werden kann.

Trotz nahezu konstanter von Mises-Spannungsverteilung entlang der Außenkontur des Wurzelanlaufes ist eine Querkzugspannungskonzentration in diesem Bereich bei allen vier betrachteten Modellen deutlich erkennbar (siehe Tafel 32 A, B, C, D).

Mit zunehmendem Dickenwachstum wandert das Querkzugspannungsmaximum von der Stammachse weg nach außen und zwar ungefähr im gleichen Maße wie der Baum außen zulegt. Bereiche, die in früherer Zeit (Wachstumsschritt 1) hohen Querkzugspannungen ausgesetzt waren, sind später (Wachstumsschritt 14) nur noch sehr gering belastet bzw. können jetzt sogar in Bereichen liegen, in denen Querdruckspannungen vorherrschen. Das Querkzugspannungsmaximum wandert also im Laufe des Baumlebens von innen nach außen, durch große Bereiche des Wurzelanlaufes. Es ist von einem globalen Koordinatensystem betrachtet nicht an einem festen Ort im Baum lokalisiert. Dieser Umstand fordert vom Faseraufbau im Holz eine Möglichkeit der Anpassung an die verschiedenen Spannungszustände, denen ein und derselbe Bereich ausgesetzt sein kann. Das in einem Baumleben nicht endende sekundäre Dickenwachstum, welches eine permanente Außengeometrieveränderung zur Folge hat, ist im wesentlichen dafür verantwortlich.

Beginnend von der Oberfläche, die geometriebedingt querkzugspannungsfrei ist, wird die Belastung des Wurzel-Stammüberganges nach innen hin zunehmend größer. Diese erreicht dann ihr Maximum im Abstand zur Modelloberfläche (r_1) von ca. $1/5$ des dortigen Stammradius (r_2), um weiter innen wieder abzuklingen (Abb. 33).

²¹ Das Modell wurde auf Querkraftbiegung von links nach rechts belastet.



Tafel 32: Radiale Querspannungsverteilung im *Modellbaum* nach den CAO-Wachstumsschritten 1 (A), 6 (B), 10 (C) und 14 (D).

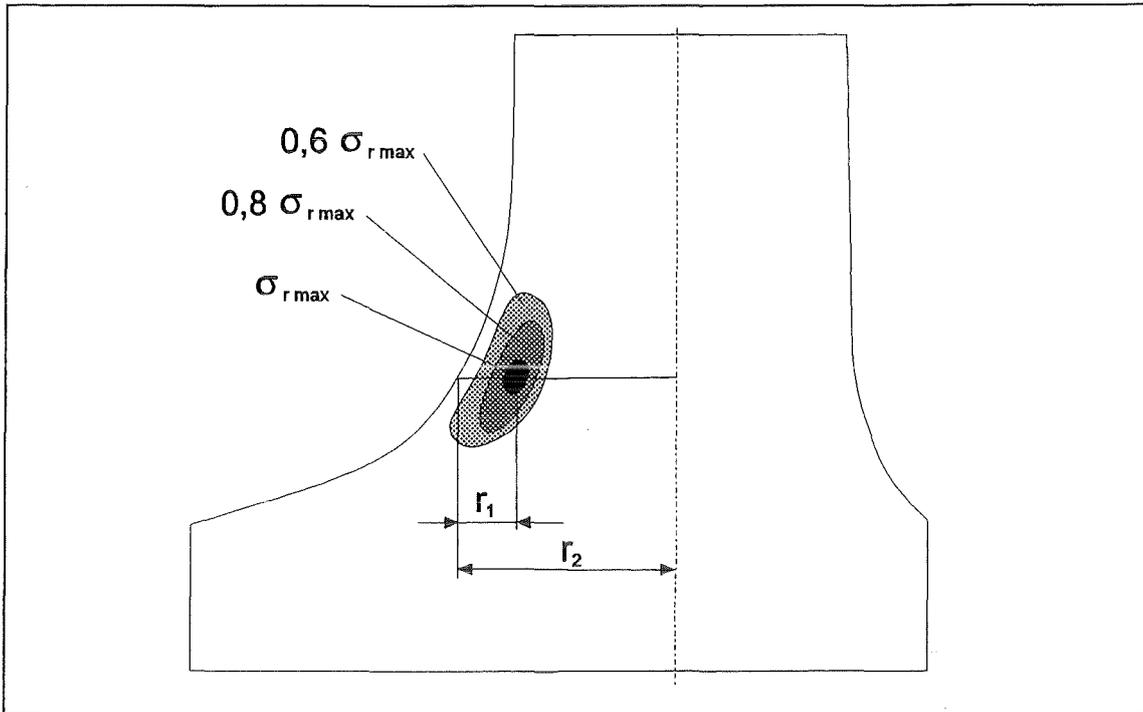


Abbildung 33: Bestimmung des Abstands r_1 , welchen das Querspannungsmaximum in Bezug auf den Stammradius (r_2) aufweist.

6.5. Die Strategie des hohlen Baumes

Bäume, die in ihrem Innern von Fäule befallen sind, haben in mehrfacher Hinsicht ein schweres Los. Zum einen müssen sie gegen den Pilz und den zunehmenden Holzabbau kämpfen, zum anderen durch vermehrten jährlichen Zuwachs auf der Außenseite den Materialverlust im Innern wieder wett machen. Zu allem Unglück breitet sich der Pilz oft ungleichmäßig aus und frißt dabei mit Sicherheit nicht gestaltoptimiert oder dem *Axiom der konstanten Spannung* gehorchend. Durch den Holzabbau der Mikroorganismen entstehen keine optimal gestalteten Querschnittsübergänge und innere Oberflächen. Vielmehr ist die Innenseite in aller Regel von Kerben übersät, was an mehreren Sägeschnitten beobachtet werden konnte. Unter Belastung können diese dann zu Kerbspannungen führen. Dies wiegt doppelt schwer, da der Baum auf diese Geometrieänderungen nicht mit innerem Reparaturwachstum reagieren kann. Derartige Wachstumsvorgänge sind allein auf das zellbildende Kambium unterhalb der schützenden Borke beschränkt.

HARTMANN (1994) konnte durch Fractometerstudien an einer hohlen Esche nachweisen, daß im Bereich des Durchmesserbruchs von Hohl- auf Vollquerschnitt, d. h. an derjenigen Stelle, an der die Faulhöhle endete, sich die gemessenen Fractometerwerte sprunghaft erhöhten. Sägeschnitte in diesem Bereich zeigten einen abrupten Übergang von Faulhöhle zum Vollquerschnitt des Reststammes. Durch höhere Festigkeiten trägt der Baum also der Kerbwirkung des Querschnittüberganges Rechnung. Weiter konnte HARTMANN zeigen, daß auch für den hohlen Baum die Querspannungen, hervorgerufen durch Biegebelastung, sich so verteilen wie die Querspannungen, hervorgerufen durch Biegebelastung. Er benutzte hierzu ein dreidimensionales, isotropes FEM-Modell.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden an einigen hohlen Laubbaumexemplaren (Pappel, Eiche und Edelkastanie) Zuwachsbohrungen entnommen. Die Bohrungen lagen jeweils in ca. 30 bis 50, 100 bis 120 und 180 bis 200 cm Höhe (vom Erdboden aus gemessen). Die Bohrkerne wurden mit dem Fractometer zur Ermittlung der radialen Biegefestigkeit in gewohnter Weise gebrochen. Aus den einzelnen Biegebruchwerten der Bohrproben wurde die mittlere Biegebruchspannung ($\bar{\sigma}_B$) ermittelt (Abb. 34).



Abbildung 34: Mit dem Fractometer gemessene und über den Bohrkern gemittelte radiale Biegefestigkeitswerte am Beispiel zweier Edelkastanien mit Faulhöhle im Stammfuß.

Die Vorgehensweise unterscheidet sich, zu der in Kapitel 6.2 praktizierten, hauptsächlich dadurch, daß hier nicht die Festigkeitsverteilungen im gekrümmten Bereich betrachtet und der Wurzelanlauf ganz bewußt ausgegrenzt wurde. Die in Kapitel 6.2 für diese gekrümmte Kontur nachgewiesene innere Festigkeitsverteilung sollte keinen Einfluß auf die Meßwerte haben. Es wurde deshalb nur im nahezu geraden Stammabschnitt gemessen.

Edelkastanien und Pappeln sind bekannt dafür, Fäule besonders schlecht abzuschotten. Es war deshalb zu erwarten, daß auch die untersuchten Restquerschnitte dieser Bäume bereits von Fäule befallen waren.

Die ausgewählten Schwarzpappeln waren nur in geringem Maße ausgehöhlt. Weite Teile der Restwand waren aber, wie schon vermutet, durch Fäuleerreger bereits infiziert. Die radialen Biegefestigkeitswerte zeigten einen starken Abfall nach ca 10 bis 12 cm der Bohrkernlänge (von außen gemessen).

Ein ähnliches Bild bot sich bei den hohlen Kastanien. Auch bei ihnen war bereits der innere Teil der tragenden Restwand durch die Fäule befallen. Einige der Jahresringe hatten keinen oder nur noch sehr geringen Zusammenhalt untereinander. Die Bohrkerne zerfielen

len oft schon in Stücke, sobald sie aus dem Hohlbohrer entfernt wurden. Die Zuwachsbohrkerne wurden nur soweit ausgewertet, wie auch gewährleistet war, daß gesundes, nicht von Fäule befallenes Holz vorlag. Das Holz der hohlen Eichen zeigte ein anderes Verhalten. Obwohl sie über zum Teil großvolumige Faulhöhlen im Stammfuß verfügten, waren die Bohrproben fest und unversehrt.

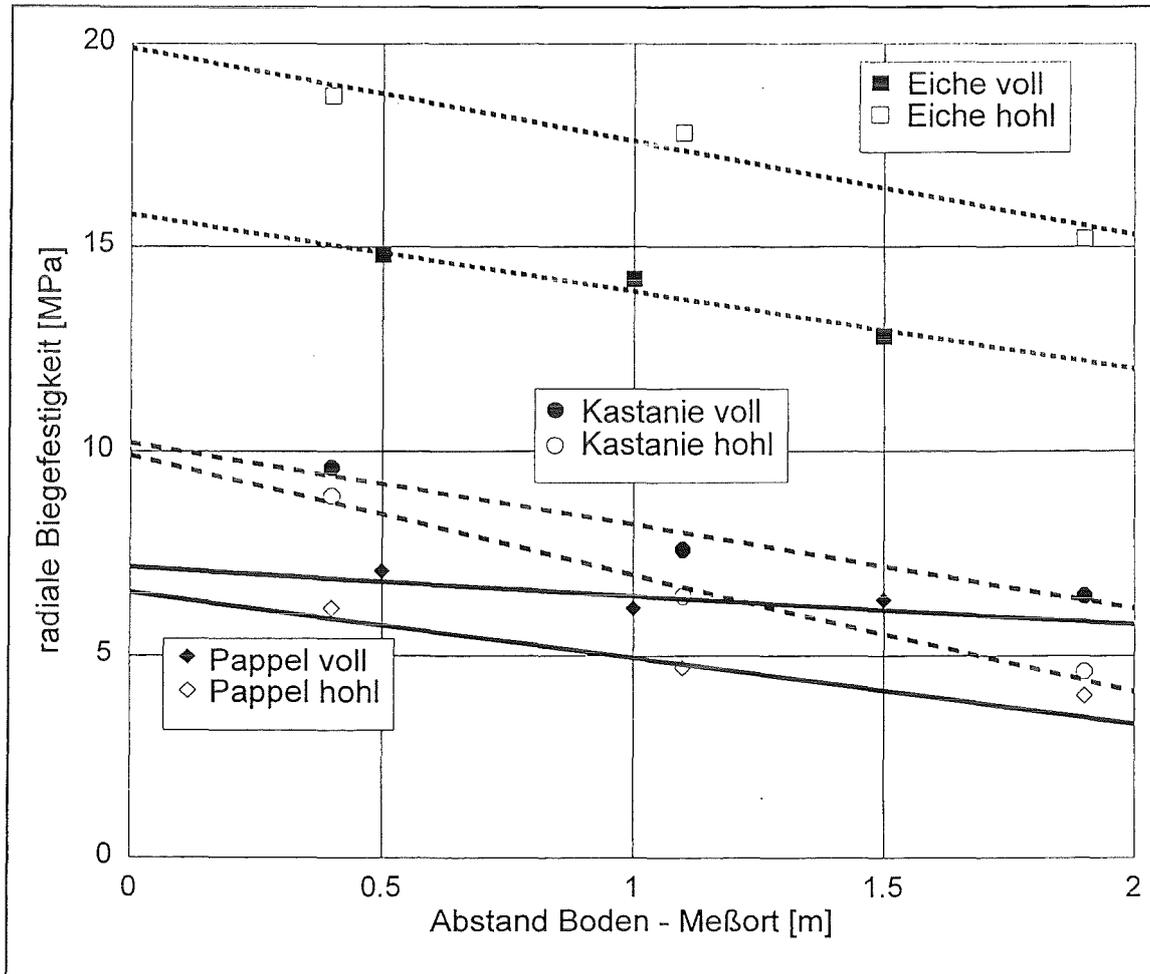


Abbildung 35: Vergleich der radialen Biegefestigkeitswerte unterschiedlicher Meßhöhen für verschiedene Bäume (Eiche, Edelkastanie und Pappel) mit Faulhöhle und vollem Stammquerschnitt (vergl. hierzu Tabelle 3).

In allen untersuchten Fällen konnte, unabhängig von Spezies und Standort, ein deutlicher Anstieg der radialen Biegefestigkeitswerte im Bereich der Faulhöhle festgestellt werden. Dies gilt sowohl für die Maximalwerte als auch für die Mittelwerte aus den einzelnen Bruchversuchen. Der Baum kann also auch auf das immer weiter fortschreitende Aushöhlen reagieren. Er hält dem immer kleiner werdenden t/R -Verhältnis erhöhte Festigkeiten entgegen. Auch waren in diesen Bereichen die gemessenen Biegewinkel der Holzproben kleiner als im noch gesunden, vollen Stammquerschnitt, was auf einen erhöhten E-Modul in diesem Bereich schließen läßt.

Zum Vergleich wurden entsprechende Messungen an gesunden Laubbäumen ähnlicher Standorte durchgeführt, die einen vollen Stammquerschnitt aufwiesen. Erst durch diese Gegenüberstellung war eine Bewertung der Fractometerwerte der hohlen Querschnitte

möglich. Denn auch bei der Referenzgruppe (gesunde Bäume mit vollem Stammquerschnitt) konnte ein Anstieg der Fractometerwerte von oben nach unten zum Wurzelanlauf hin beobachtet werden. Dieser Anstieg fällt aber geringer aus als bei den Bäumen, deren Querschnitt durch Fäule geschwächt war.

Baumart	Querschnitt	Geradengleichung	Regressionskoeffizient r^2
Pappel	hohl	$\sigma_{\text{hohl}} = 19,9 - 2,3x$ [MPa]	0,95
	voll	$\sigma_{\text{voll}} = 15,8 - 1,9x$ [MPa]	0,95
Edelkastanie	hohl	$\sigma_{\text{hohl}} = 9,9 - 2,9x$ [MPa]	0,99
	voll	$\sigma_{\text{voll}} = 10,2 - 2,0x$ [MPa]	0,95
Eiche	hohl	$\sigma_{\text{hohl}} = 6,6 - 1,5x$ [MPa]	0,96
	voll	$\sigma_{\text{voll}} = 7,2 - 0,7x$ [MPa]	0,62

Tabelle 3: Geradengleichungen und Regressionskoeffizienten für die untersuchten Baumquerschnitte (σ_{hohl} : mittlere Querfestigkeit im Hohlquerschnitt; σ_{voll} : mittlere Querfestigkeit im Vollquerschnitt, x = Meßhöhe).

Das Diagramm in Abbildung 35 zeigt die Werte der radialen Biegebruchspannung der Mittelwerte und deren Standardabweichung für die einzelnen Meßhöhen eingetragen. Dem Diagramm liegen die Werte von 19 Meßreihen an hohlen Edelkastanien, Schwarzpappeln sowie Eichen und 17 Meßreihen an gesunden Bäumen²² der gleichen Art mit vollem Querschnitt zugrunde. Die teilweise verschiedenen Festigkeitsniveaus der Ausgleichsgeraden innerhalb der einzelnen Baumarten, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf unterschiedlich hohe äußere mechanische Belastungen zurückzuführen. So standen die hohlen Pappeln z. B. innerhalb eines größeren Bestandes, während die gesunden Referenzbäume am windexponierten Bestandsrand angesiedelt waren. Die Randbäume sind dabei höheren Windbelastungen ausgesetzt und müssen aus diesem Grunde insgesamt höhere Holzfestigkeiten aufweisen.

6.6. Holzanatomische Untersuchungen

Die theoretischen Spannungsanalysen mit FEM und die Festigkeitsmessungen mit dem Fractometer wurden an einigen ausgewählten Bäumen um eine mikroskopische, holzanatomische Untersuchung erweitert. Hierzu wurden je eine Buche, Esche, Kirsche und Eiche ausgewählt. Die Baumstrukturen wurden dabei nach den gleichen Gesichtspunkten ausgesucht, die schon in Kapitel 6.2 als Auswahlkriterium herangezogen wurden (der zu untersuchende Wurzelanlauf sollte in Hauptwindrichtung zeigen, Wuchs und Belastung sollten möglichst symmetrisch sein). Sowohl aus dem Bereich der maximalen Krümmung als auch aus dem geraden Stammbereich wurden jeweils ein Bohrkern ent-

²² Die Biegefestigkeitswerte der Pappeln mit vollem Stammquerschnitt wurden freundlicherweise von Herrn I. Tesari zur Verfügung gestellt.

nommen. Die Vorgehensweise hierbei war identisch mit der in Kapitel 5.2.1 ausführlich beschriebenen.

Nach der bereits an mehreren Beispielen nachgewiesenen Festigkeitsverteilung in gekrümmten Baumteilen war anzunehmen, daß die Festigkeitswerte aus dem Krümmungsbereich höher sind als die aus dem geraden Stammbereich.

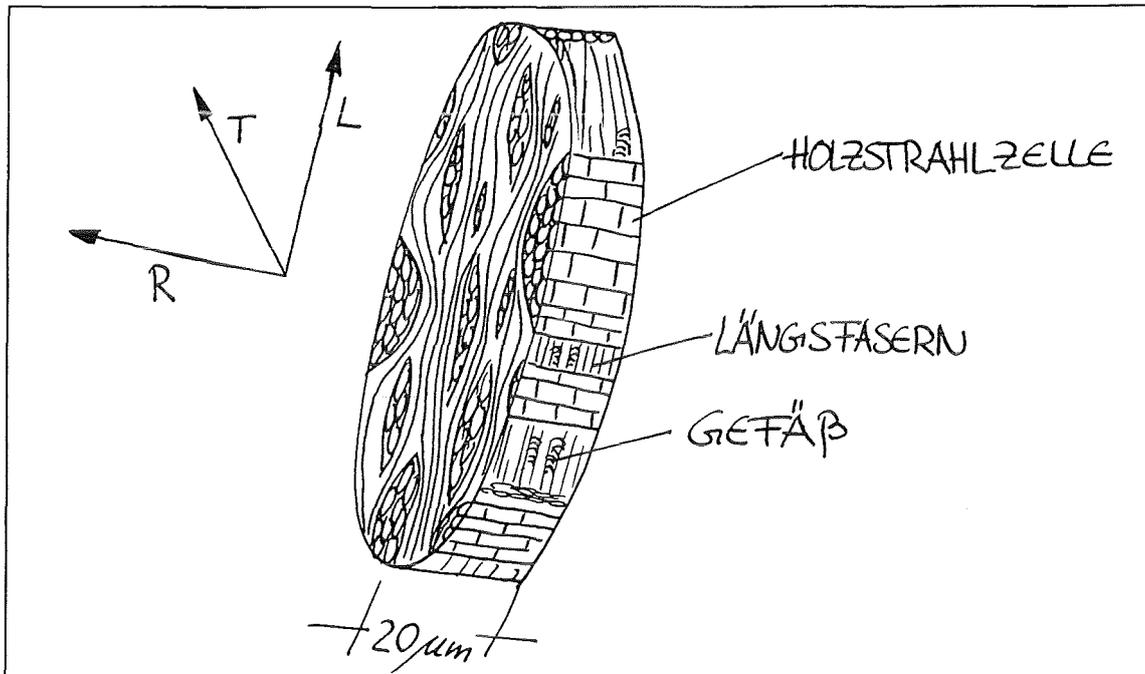


Abbildung 36: Schematische Darstellung eines Dünnschnittes.

Die Bohrkern wurden mit dem Fractometer II gebrochen, die jeweiligen Festigkeitswerte notiert und den einzelnen Bruchflächen zugeordnet. In allen Fällen konnte die angestellte Vermutung bestätigt werden. Die höchsten Festigkeitswerte wurden in den Bohrkernen aus dem Krümmungsbereich des Wurzelanlaufes gemessen. Die durchweg geringeren Fractometerwerte stammten von denjenigen Bohrkernen, die dem geraden Stammbereich entnommen wurden²³.

Aus jedem Bohrkern wurde ein repräsentatives Bruchstück wie nachfolgend beschrieben präpariert:

- Von der Bruchfläche werden auf einem Mikrotomaten Dünnschnitte der Stärke 20 µm angefertigt (siehe Abb. 36).
- Entfernen sämtlicher Zellinhaltsstoffe durch Einlegen in Javelle-Wasser (14%).

²³ Die Bohrkern der Buche waren aus technischen Gründen ca. 30 Stunden in Leitungswasser eingelegt. Die gemessenen Fractometerwerte geben in diesem Fall nicht die Originalfestigkeiten des Buchenholzes wieder, wie sie mit dem baumspezifischen Feuchtegehalt gewesen wären. Ein eventueller Feuchtegradient wurde durch diese Maßnahme egalisiert. Der Unterschied in der Höhe der Fractometerwerte von Stammbereich und Wurzelanlauf war trotz dieser Vorbehandlung deutlich meßbar.

- Spülen der Dünnschnitte und zum Färben in Safraninlösung (1%) einlegen.
- Schnitte abspülen und in einer Alkoholreihe (50%, 75%, 96% und 100%) und danach in Xylol vollständig entwässern.

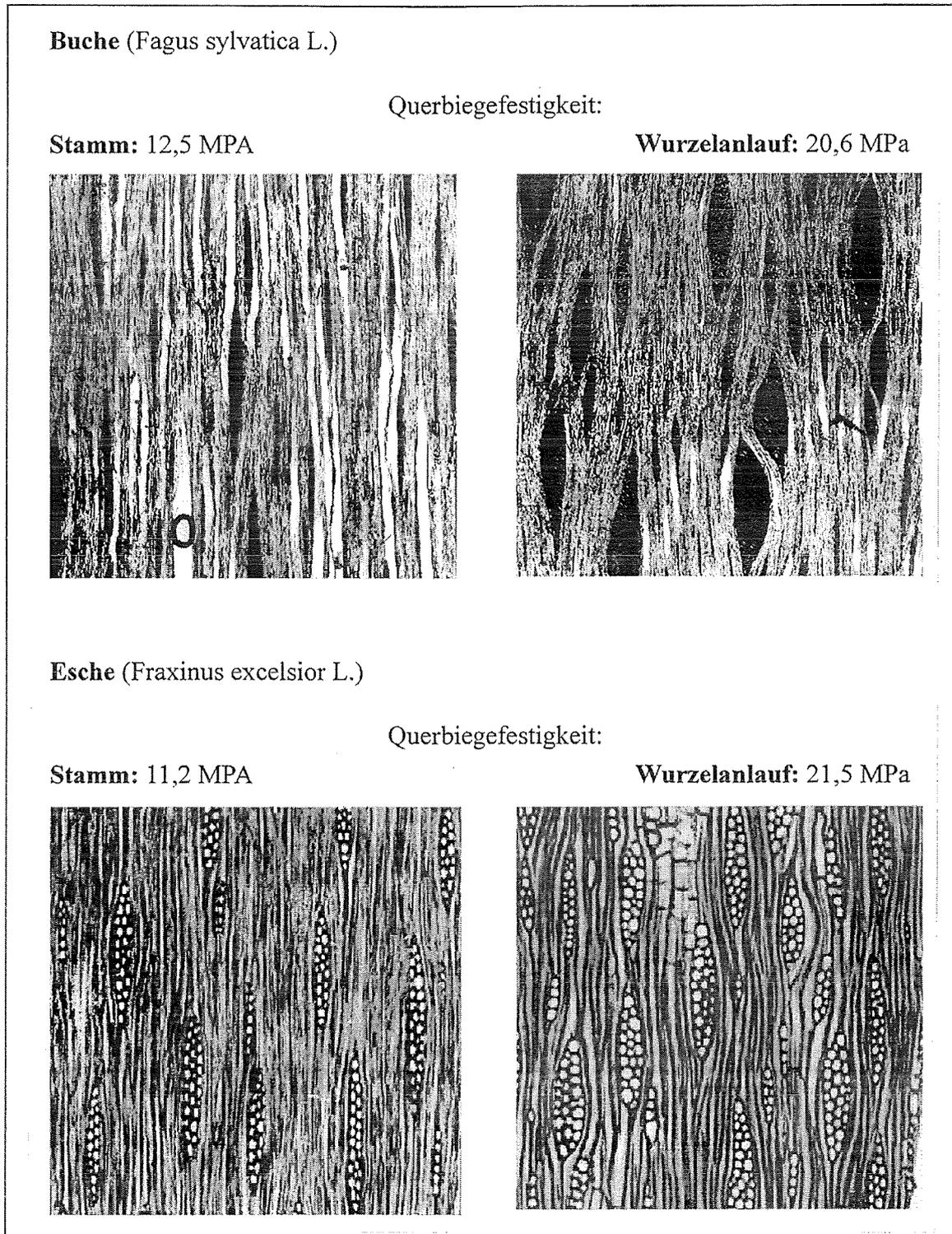
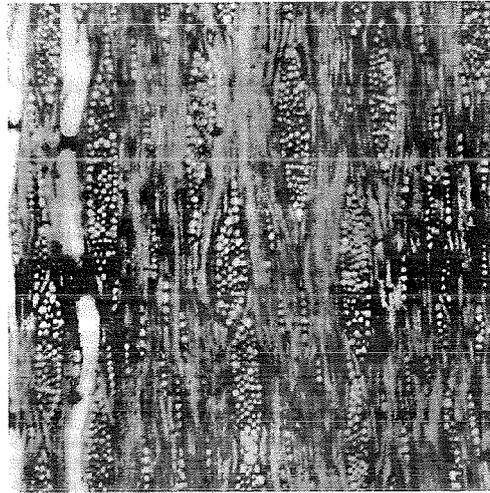
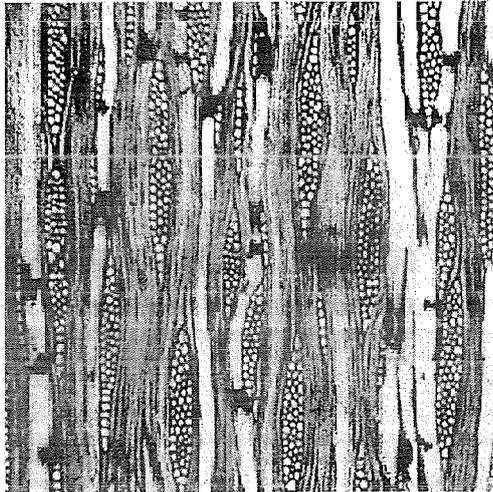


Abbildung 37: Vergleich der Holzstrahlquerschnitte von Stamm- (links) und Wurzelanlaufbereich (rechts) für Buche und Esche mit den dazugehörigen Biegebruchfestigkeitswerten (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Dr. F. H. Schweingruber).

Kirsche (*Cerasus avium* Moench)

Querbiegefestigkeit:

Stamm: 11,6 MPa**Wurzelauftrieb:** 24,6 MPa**Eiche** (*Quercus robur* L.)

Querbiegefestigkeit:

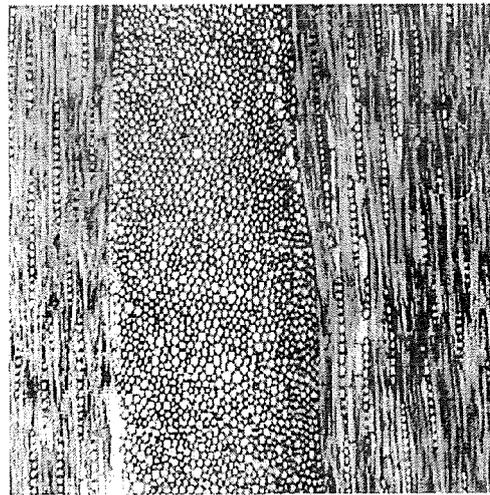
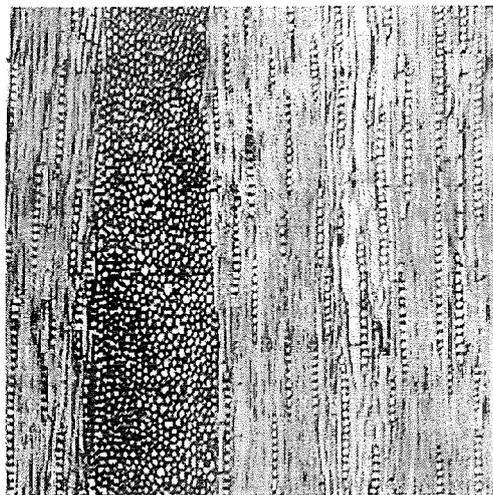
Stamm: 17,9 MPa**Wurzelauftrieb:** 22,4 MPa

Abbildung 38: Vergleich der Holzstrahlquerschnitte von Stamm- (links) und Wurzelauftriebsbereich (rechts) für Kirsche und Eiche mit den dazugehörigen Biegebruchfestigkeitswerten (Mit freundlicher Unterstützung von Prof. Dr. F. H. Schweingruber).

- Mit Eukitt und Deckglas die Schnitte auf einem Objektträger fixieren.

Die so präparierten und gefärbten Dünnschnitte wurden bei 25facher Vergrößerung im Durchlichtmikroskop betrachtet und fotografiert.

Die Tangentialschnitte zeigen die Holzstrahlen als mehr oder weniger schlanke Spindeln, die die Holzfasern sanft um sich herumleiten, was zunächst nichts Neues darstellt. Über die Form und das Aussehen von Holzstrahlen ist bereits viel gearbeitet und veröffentlicht worden. Sie werden unter anderem zur Identifikation und Unterscheidung verschiedener Holzarten herangezogen (SCHWEINGRUBER 1990). Ein bisher scheinbar unbeobachtet gebliebenes Phänomen ist jedoch die unterschiedliche geometrische Form der Holzstrahl-Spindeln aus dem Stamm- und Wurzelanlaufbereich. Dieser Unterschied konnte an allen vier untersuchten Spezies beobachtet werden.

Die Holzstrahl-Spindeln aus dem Wurzelanlauf sind im allgemeinen kürzer und breiter als diejenigen aus dem geraden Stammabschnitt. Die Spindeln der Holzstrahlen aus dem Wurzelanlauf wirken gedrungener (vergleiche hierzu Abb. 37 und 38). Besonders deutlich ist dies bei den Holzstrahlen der Buche zu erkennen. Die Geometrien einiger auffallend großer Holzstrahlen aus dem Wurzelanlauf haben einen nahezu ovalen Querschnitt (Abb. 37 oben).

Bei Eiche, Kirsche und Esche sind die geometrischen Unterschiede nicht in gleichem Maße deutlich. Die Tendenz, im Wurzelanlauf etwas weniger hohe dafür aber breitere Holzstrahlen zu bilden als im geraden Stamm, ist dennoch eindeutig erkennbar.

7. Diskussion

7.1. Biegebalken

Wird eine gekrümmte Geometrie in der Weise belastet, daß sie aufgebogen, der Krümmungsradius also verringert wird, kommt es unvermeidbar zu Radialzugspannungen. Diese haben im Innern ihr Maximum und nehmen an den Rändern der Struktur bei Fehlen äußerer radialer Belastung den Wert Null an. Dies konnte durch analytische und numerische Berechnungen bestätigt werden. σ_r, \max wird von allen vier betrachteten Lösungsansätzen (isotrop, orthotrop, CAIO und NORRIS) am etwa gleichen Ort innerhalb des Biegebalkens lokalisiert. Das von FOSCHI (1968) gewonnene Ergebnis, das E-Modulverhältnis längs zu radial habe nur eine untergeordnete Bedeutung für die σ_r -Verteilung, wird hierdurch indirekt bestätigt. Für die Art der σ_r -Verteilung spielt also lediglich die Geometrie des gekrümmten Trägers eine Rolle.

Durch die Anwendung von CAIO kommt es im Bereich der neutralen Faser der Biegung im gekrümmten Biegeträger zu Materialorientierungen, die stark von der strengen tangential-radial Orientierung abweichen, was auch von KRIECHBAUM (1994) für einen auf Biegung belasteten Kragträger beobachtet wurde. Diese ist den Wachstumskegeln der Bäume nicht unähnlich. Andererseits ist dort auch durch die mit CAIO berechnete Faserverteilung, wegen der Kleinheit der Spannungen, mit den größten Rundungsfehlern behaftet. Die unterschiedliche σ_r -Spannungsverteilung der CAIO-Lösung im Bereich um den mittleren Radius (R_m), im Vergleich mit der analytischen oder den FE-Lösungen, ist im wesentlichen auf diesen Unterschied zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Biegebalkenberechnung lassen den Schluß zu, daß man die Spannungsberechnungen der Wurzelanläufe sowie der anderen Baumgeometrien (Kap. 5.4) auch mit isotropen Materialeigenschaften durchführen hätte können. Bei der Form- und Geometrievielfalt der natürlich vorkommenden *Unglücksbalken* wäre es aber verfrüht und unzulässig anzunehmen, daß das hier erhaltene Ergebnis prinzipiell für alle Geometrien gleichermaßen gilt. Somit stellte die CAIO-Methode, mit der Möglichkeit die FE-Struktur mit der natürlich vorkommenden Materialorientierung zu modellieren, den wohl allgemeinsten rechnerischen Zugang dar.

Das Wachstum der Bäume ist auf deren Oberfläche beschränkt. Immer nur der neu zu wachsende Jahresring kann auf die aktuell herrschenden Spannungszustände reagieren. Das Kambium zeigt sich aber immer dann mit der Geometrie zufrieden, wenn eine konstante Spannungsverteilung auf der Oberfläche erreicht ist. Bleibt dadurch die Krümmung der Struktur im wesentlichen erhalten, so hat diese Spannungskonstanz nur marginalen Einfluß auf die innere Spannungsverteilung.

7.2. Festigkeits- und Spannungsverteilungen

Die Materialorientierungen der Wurzelanläufe und der anderen gekrümmten Baumgeometrien wurden sämtlich mit dem CAIO-Verfahren ermittelt. Dadurch wurde auf iterativem Wege eine Faserorientierung gefunden, die unter Biegebelastung weitestgehende

Schubspannungsfreiheit für das Modell garantierte. Somit mußten Faserverlauf bzw. Materialorientierung nicht erst "geraten" werden, wodurch zusätzliche Fehler bei der Modellierung vermieden werden konnten.

Trotz Reduzierung der ausgesuchten Bäume auf zweidimensionale FEM-Modelle, unter Vernachlässigung einer eventuell existierenden Elastizitätsmodulverteilung und Berücksichtigung möglicher Parallaxefehler beim Erstellen der Photos und somit auch Fehler bei der Strukturierung, gleichen sich die Festigkeits- und Spannungsverteilungen in überzeugender Weise.

Es wurden Bäume der unterschiedlichsten Spezies, Alters und Durchmessers mit dem Fractometer vermessen und mit der FE-Methode deren innere Spannungen unter Biegebelastung analysiert. Das Maximum der gemessenen Biegefestigkeitsverteilung konnte in allen Fällen in jenen Bereichen nachgewiesen werden, in denen auch die maximalen σ_r -Spannungen kalkuliert wurden. Dies gilt uneingeschränkt für Baumarten, die sehr umfangreiche Holzstrahlen bilden wie z. B. die Buche und Eiche sowie auch für Nadelhölzer, welche nur einreihige Holzstrahlen bilden.

Auch bei Bäumen, welche durch starke Zugholzanlagerungen gekennzeichnet waren, blieben die gemessenen radialen Biegefestigkeitsverteilungen und die berechneten Querspannungsverteilungen nahezu identisch. Dies läßt den Schluß zu, daß die axiale Eigenspannungsverteilung keinen wesentlichen Einfluß auf die σ_r -Verteilung nimmt.

Die gemessenen Festigkeitsverteilungen wurden rein qualitativ mit den berechneten Querspannungsverteilungen verglichen. Die Vielzahl der Beispiele, die eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse zeigen, läßt eine zufällige Gleichheit praktisch ausschließen. Es kann davon ausgegangen werden, daß der Baum einen Mechanismus besitzt, der ihn in die Lage versetzt, seine Festigkeiten in radialer Richtung dem aktuellen inneren Spannungszustand anzupassen. Ist solch ein Mechanismus für die Wurzelanlaufgeometrie aufgrund genetischer Vorgaben noch denkbar, so kann dieser für die anderen Krümmungsgeometrien nicht gelten. Da ein Wurzelanlauf mit höchster Wahrscheinlichkeit ein gesamtes Baumleben lang ein Wurzelanlauf bleiben wird, könnte sich eine, auf den typischen Belastungszustand abgestimmte Festigkeitsverteilung aus der evolutionären Erfahrung heraus einstellen. Dies würde allerdings voraussetzen, daß sich die Lebens- und Belastungsbedingungen für den Einzelbaum nicht gravierend ändern, da Optimieren immer auch Spezialisieren auf einen genau definierten Belastungsfall einschließt. Es könnte also von einem *echten* Optimierungsmechanismus nicht mehr die Rede sein, da von einem solchen eine flexible Anpassung an die jeweils vorgegebene Belastungssituation zu fordern wäre.

Für alle anderen gekrümmten Baumteile kann eine genetisch verankerte also vorausbestimmte Festigkeitsverteilung ausgeschlossen werden. Welcher Stamm weiß schon, ob der Baum einmal mit seinem Wurzelstock abrutscht und der Stamm sich verbiegen muß, um den Kronenschwerpunkt wieder über sein Wurzelzentrum zu bringen? Wie soll es einem Ast möglich sein, im Voraus zu wissen, daß sich seine Umgebungsverhältnisse ändern und er nicht länger gerade wachsen kann, sondern sich nach oben biegen muß, um weiterhin genügend Licht zu erhalten? Ohne eine an die allein durch die Krümmung verursachte Radialspannungsverteilung angepaßte Festigkeitsverteilung wären diese Struk-

turen extrem delaminationsgefährdet. Der Baum hätte unter starken Windbelastungen nicht lange Freude an diesen Krümmungen. Strukturen mit einer fest vorgegebenen Festigkeitsverteilung haben unter den wechselnden Bedingungen in der Natur kaum eine Überlebenschance. Es würde im übrigen auch sehr verwundern, wenn der sonst so flexibel auf die variierenden Umweltbedingungen reagierende Baum sich ausgerechnet in seinem Innern lediglich auf eine genetisch einmal festgelegte Festigkeitsverteilung verlassen würde.

Einen ersten Hinweis zum Lösen dieser Aufgabe geben die Holzstrahlen. Sie sind die einzigen Holzzellen, die radial, genau in Richtung der σ_r -Belastung verlaufen. Zur Aufnahme von radialen Zugbelastungen sind diese Gewebeteile somit bestens geeignet. Die den Holzstrahl umgebenden Parenchymzellen sind nicht abgestorben, sondern leben auch dann noch, wenn das den Holzstrahl umgebende Längsgewebe aus toten Zellen besteht. Diese lebenden Zellen sind ein weiterer Hinweis auf die besondere Stellung der Holzstrahlen für den Baum. Wären dem Holzstrahl vom Baum reine Transport- und Speicheraufgaben zugeordnet, wären lebende Zellen nicht notwendig. Im Gegenteil, die lebenden und gefüllten Zellen behindern eher den Transport von großen Wasser- und Nährstoffmengen durch sie hindurch. Die lebenden Zellen könnten im Zusammenhang mit einem festigkeitsveränderndem Mechanismus im Bauminnern eine entscheidende Rolle spielen. Denn Leben heißt auch: Möglichkeit zu Veränderungen, Entwicklung oder Reaktion. Zu welcher enormen, aktiv gesteuerten Veränderung der Baum in seinem Innern in der Lage ist, beschreibt BRAUN (1992) anhand des Umwandlungsprozesses vom Splint- zum Kernholz. Solche Umwandlungsprozesse brauchen also prinzipiell nicht ausgeschlossen werden. Andererseits ist lebendiges Reagieren nicht erforderlich, um wandernde Festigkeitsmaxima zu erklären. Es sind auch physikalische oder physikalisch-chemische Mechanismen zu deren Erklärung denkbar.

Betrachtet man die Querfestigkeiten im geraden Stamm und vergleicht diese mit denjenigen aus dem Krümmungsbereich, so liegen die letztgenannten im Mittel um ca. 20 bis 40% höher. Das Maß der Festigkeitsüberhöhung im delaminationsgefährdeten Bereich hängt dabei nicht nur vom Grad der Krümmung ab, sondern auch von der Höhe der Wind- oder Eigengewichtsbelastung.

Als Reaktion der Holzstrahlen auf die σ_r -Verteilung kann ein die äußere Form und Geometrie verändernder Mechanismus nicht zugelassen werden. Die äußere Geometrie und Größe der Zellen und somit auch das die Holzstrahlen umgebende Material wird wenige Tage nach Entstehung durch Lignifizierung fixiert, sowie der Fibrillenwinkel unveränderbar festgelegt.

7.3. Festigkeitsverteilung im Bohrkern

Ein Verfestigungsmechanismus, der von außen nach innen die radiale Festigkeit in einem Abstand zur Rinde mit jedem Jahresringzuwachs erhöht, kann aufgrund des Kurvenverlaufs in Abbildung 28 mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Ein Mechanismus, der lediglich zu stetigem Anlagern von Material oder Verstärken der Zellwände in der Lage wäre, würde eine Festigkeitsverteilung entlang des Bohrkernes erzeugen, die der Form eines langgestreckten Sägezahnes nicht unähnlich wäre. Ein von

außen nach innen erfolgender plötzlicher, steiler Anstieg der radialen Biegefestigkeitswerte bis zum Erreichen des Maximalwertes gefolgt von einem sanften aber stetigen Abnehmen dieser Werte nach innen hin, wäre charakteristisch für solch einen Verfestigungsmechanismus. Von außen nach innen gemessen zeigten die Fractometeruntersuchungen zwar einen steilen Anstieg der Biegefestigkeitswerte zum Erreichen des lokalen Festigkeitshöchstwertes, nach Erreichen dieses höchsten Festigkeitswertes ergab sich jedoch ein nahezu ebenso steiler Abfall der radialen Biegefestigkeiten. Die Festigkeitswerte zum Stamminnern hin lagen dabei im Mittel nur wenig über den gemessenen radialen Biegefestigkeitswerten vor Erreichen des lokalen Maximums. Es müßte also möglich sein, Stoffe in die Zellwände der Holzstrahlen einzulagern, welche die Festigkeit erhöhen, aber aus diesen bei Bedarf wieder langsam herausgelöst werden können. Ein Zusammenwirken mehrerer Effekte (biologischer und physikalischer Art) ist hierbei möglich.

Ausnahmslos alle Holzstrahlen stehen mit dem Kambiumzylinder in mechanischer Verbindung. Auf diesem Übertragungsweg könnten die Holzstrahlen somit dem Kambium ihren radialen Belastungszustand mitteilen. Dieses wäre dann eventuell in der Lage, auf die jeweilige Situation mit speziellen Wachstums- und Steuerprogrammen zu reagieren. Ein *biophysikalisches* Problem, das auf seine Erklärung wartet.

7.4. Wanderndes Maximum

Das Maximum der Radialspannungen befindet sich im Laufe eines Baumlebens nicht immer an der gleichen Stelle. Dies wird sofort einsichtig, wenn man die Ergebnisse der Biegebalkenberechnung betrachtet. Die σ_r -Verteilung hängt bei reiner Biegebelastung nur von Geometriefaktoren ab. Der Baum ändert seine Außengeometrie durch sekundäres Dickenwachstum ständig, was automatisch eine Änderung in der σ_r -Verteilung erzwingt.

Mit der CAO-unterstützten Wachstumssimulation eines Wurzelanlaufes konnte diese Vermutung rechnerisch bestätigt werden. Von einem globalen Koordinatensystem aus betrachtet verschiebt sich die σ_r -Verteilung im gleichen Maße, wie sich die Außengeometrie durch Zuwachs verändert. Das Spannungsmaximum bleibt dabei immer in gewissem Abstand unter der Oberfläche. Das Ergebnis über die Entfernung, welche das Querspannungsmaximum zur Oberfläche einnimmt, läßt sich nicht verallgemeinern. Die Lokalisierung von $\sigma_{r, \max}$ im Abstand von $1/5$ des dortigen Stammradius, stellte sich aufgrund der gegebenen Einspannungs- und Belastungsbedingungen ein. Es ist anzunehmen, daß sich für andere Randbedingungen das Verhältniss von r_1/r_2 ebenfalls ändert (Abb. 33).

Eine auf die Geometrie oder Anzahl der Holzstrahlen pro Fläche abgestimmte Festigkeitserhöhung für diesen Bereich kann nach heutigem Stand der Holzphysiologie ausgeschlossen werden. Dies hat hauptsächlich zwei Gründe:

1. Das Kambium als alleinige zellbildende Steuerzentrale entscheidet, wieviele Holzstrahlen entstehen und wie groß diese sein werden. Dies geschieht zu einem Zeitpunkt, während dem die Radialbelastung in diesen Zellschichten nahezu Null ist. Wenige Tage nach der Zellbildung sind deren Größe, Anzahl und Geometrie festgelegt. Daran läßt sich dann im Innern des Stammes, wegen der umgebenden Holzmasse, nichts mehr ändern.

2. Der Baum kann nicht voraussehen, welche σ_r -Verteilung, zu welchem Zeitpunkt in ihm vorherrschen wird. Jede äußere Belastungsänderung, die den vorgegebenen Gleichgewichtszustand ändert, führt zu Wachstumsreaktionen des Baumes. Sind damit Änderungen in der Baumgeometrie verbunden, haben diese dann auch Einfluß auf die innere Spannungssituation.

Begleitet man in Gedanken einmal einen frisch gebildeten Jahresring (im Wurzelanlauf auf der windzugewandten Seite) über seine nächsten Lebensjahre, so werden in den Folgejahren immer neue Holzzylinder über diesen Jahresring gelegt. Seine Belastung durch Radialspannungen nimmt ständig zu, und von außen betrachtet, befindet er sich immer weiter im Innern des Stammes. Mit jedem neuen Jahrring und damit verbundener Umfangsvergrößerung des Stammes nimmt die σ_r -Belastung bei Biegung des Stammes z. B. durch Wind stetig zu, bis sie ein Maximum erreicht. Die nächsten Zuwächse bringen ab diesem Zeitpunkt dann wieder Entlastung für den betrachteten Jahrring. Auf diese unterschiedlichen Belastungszustände können die Holzstrahlen somit nicht durch Anzahl oder Geometrieänderung reagieren, da dieser Prozeß kurz nach ihrer Entstehung als abgeschlossen gilt. Ein Mechanismus, der in optimaler Weise auf diese σ_r -Verteilung reagiert, müßte also zunächst in der Lage sein, σ_r -Spannungen zu detektieren, um dann die Festigkeiten in den entsprechenden Bereichen zu erhöhen, und nachdem das Spannungsmaximum dieses Gebiet passiert hat, diese wieder zu reduzieren.

Ein Vorgang, der die Zellwände der Holzstrahlen im gekrümmten und hochbeanspruchten Stammbereich verdickt bzw. durch weitere Lignin- oder Celluloseeinlagerungen verstärkt, ist prinzipiell vorstellbar. Er könnte für die lokale Festigkeitserhöhung verantwortlich sein. Durch reine Anlagerungs- und Anbauvorgänge ist das Wandern des Festigkeitsmaximums jedoch nicht erklärbar, denn die Festigkeit müßte im Folgejahr an dieser Stelle wieder reduziert werden können. Ein vom Baum gesteuerter Cellulose- oder Ligninabbau in dessen Stamminnern konnte bisher jedoch nicht beobachtet werden.

7.5. Der hohle Baum

Der Baum reagiert auf den zunehmenden Materialabbau im Innern in aller Regel mit Erhöhen des Stammdurchmessers an dieser Stelle. Bei fortgeschrittener Aushöhlung ist dies häufig an einer deutlichen Verdickung des Stammes an solchen Orten bemerkbar. Die Vergrößerung des Querschnitts ist auch in der Technik ein beliebtes, weil einfaches Mittel, das Widerstandsmoment nachhaltig zu erhöhen.

Werden die Wandstärken sehr dünn im Vergleich zum Stammradius, bessert der Baum mit höheren Holzqualitäten nach. Selbst auf die Kerbe, die durch den Querschnittsübergang von hohlem Stamm auf den Vollquerschnitt entsteht, reagiert er mit einem Sprung in den Fractometerwerten. Auch dieses Prinzip findet im Maschinenbau immer dort Anwendung, wo Querschnittsübergänge hoch belastet aber unvermeidbar sind. Der Kerbgrund wird dann durch Einsatzhärtung verstärkt.

Mit der Möglichkeit lokal die Festigkeiten zu steuern, kann sich der Baum sehr effektiv gegen die, durch den Pilz verursachten, inneren Kerben wehren und der Gefahr des Stammbruches, hervorgerufen durch lokales Versagen, entgegenwirken. MATTHECK *et al.* (1995) beschreiben diesen Anstieg der Fractometerwerte im hohlen Stammbereich als den

Überlebenswillen der Bäume. In der Tat, würde der Baum nur seinen Außendurchmesser gemäß dem *Axiom der konstanten Spannung* an die Aushöhlung anpassen, würde er bald wegen zu geringer Wandstärken entweder durch Querschnittsverflachung oder Schalenbeulen versagen. Nur das zusätzliche Erhöhen der Materialkonstanten sichert ihm die Widerstandsfähigkeit gegen die zukünftigen Belastungen.

Das Diagramm in Abbildung 35 verdeutlicht, daß der hohle Baum sich nicht alleine auf das Vergrößern seines Stammdurchmessers im von Fäule befallenen Bereich verläßt. Der ausgehöhlte Baum erhöht zum Wurzelstock hin seine Holzfestigkeitswerte in wesentlich stärkerem Maße als dies für vergleichbare gesunde Stämme mit Vollquerschnitt der Fall ist. Somit trägt er der erhöhten Materialbeanspruchung, des in diesem Bereich zusätzlich geschwächten Stammquerschnitts, Rechnung. Bäume können also ihren Belastungszustand detektieren und mit verschiedenen Wachstumsprogrammen auf diesen reagieren. Hat in einem Baum der Holzabbau durch Pilze oder Insekten begonnen, so bildet er im nächsten zuwachsenden Jahresring Holzqualitäten aus, die durch höhere Festigkeiten gekennzeichnet sind, wenn die Schwächung vom Kambium detektiert wurde.

Aufgrund der wenigen unterschiedlichen Spezies und der relativ geringen Anzahl an untersuchten Einzelbäumen ist eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf andere Baumarten nicht empfehlenswert. Die zahlreichen verschiedenen, oft auch selektiven Abbaumechanismen der Fäuleerreger erfordern weitere umfangreichere Studien.

Ein hohler Baum, dessen Festigkeiten in der Restwand deutlich über den für seinen Standort und Art üblichen Werte liegen, will leben. Ein Baum, der seine Materialqualitäten nicht an die gegebenen Belastungen anpaßt, hat den Kampf gegen die innere Fäule, aus welchen Gründen auch immer, bereits aufgegeben. Solche Bäume stellen, stehen sie an verkehrsreichen Standorten oder in der Nähe von Häusern, ein nicht zu unterschätzendes Sicherheitsrisiko dar.

Die Querfestigkeiten, gemessen mit dem Fractometer, verteilen sich auch im ausgehöhlten Stamm weitestgehend wie die Radialzugspannungen. Dies ist ein weiterer Hinweis dafür, daß die Querfestigkeit von lebendem Holz keine unveränderliche Größe ist, sondern der Baum die Möglichkeit hat, diese lokal an die Spannungsgegebenheiten anzupassen. Denn, ob und von welchem Fäuletyp ein Baum befallen wird, kann von diesem nicht vorausgesehen werden. Auch nicht, wie schnell der Pilz ihn aushöhlen wird. Der Ort des Querspannungs-Maximums wird in diesem Fall nicht nur durch das sekundäre Dickenwachstum, sondern auch durch die Geometrieänderung aufgrund des inneren Holzabbaus bestimmt. Kann das erstgenannte noch vom Baum selbst gesteuert werden, ist er im zweiten Fall *Opfer*, welches nur noch reagieren kann. Gerade durch den Vorgang des Aushöhlens müssen Holzbereiche im Stamm Belastungen aufnehmen, für die sie ursprünglich nicht gedacht waren. In diesen Fällen muß der Baum über einen effektiven Mechanismus verfügen, mit dem er diese Stellen nachbessern und für die neue Belastungssituation optimieren kann.

7.6. Holzanatomische Untersuchungen

Die Speicher- und Transportfunktion der Holzstrahlen ist weithin bekannt (TROLL 1959, STRASBURGER 1991, BRAUN 1992). Die Barrierefunktion gegen Fäuleerreger in Um-

fangsrichtung ist bei SHIGO (1990) ausführlich beschrieben. Unerwähnt blieb bisher die unterschiedliche Querschnittsform der Holzstrahlen im Tangentialschnitt, betrachtet man verschiedene Stammbereiche.

Die differenten Holzstrahlformen in Stamm- und Wurzelanlaufbereich müssen genetisch (aus evolutionsgeschichtlicher Erfahrung heraus) verankert sein. Eine nachträgliche Geometrieänderung der Holzstrahlaußenform kann wegen der umgebenden verholzten Gewebe nicht stattfinden. Die Geometrieverhältnisse der Fasern und Holzstrahlen werden kurz nach ihrer Bildung durch das Kambium festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt ist die radiale Belastung dieser Bereiche jedoch gering. Ebenfalls denkbar ist auch, daß die mit dem Kambium in ständiger Verbindung stehenden Holzstrahlen diesem ihre Belastungssituation mitteilen können und das Kambium dann mit den entsprechenden Bauplänen darauf reagiert.

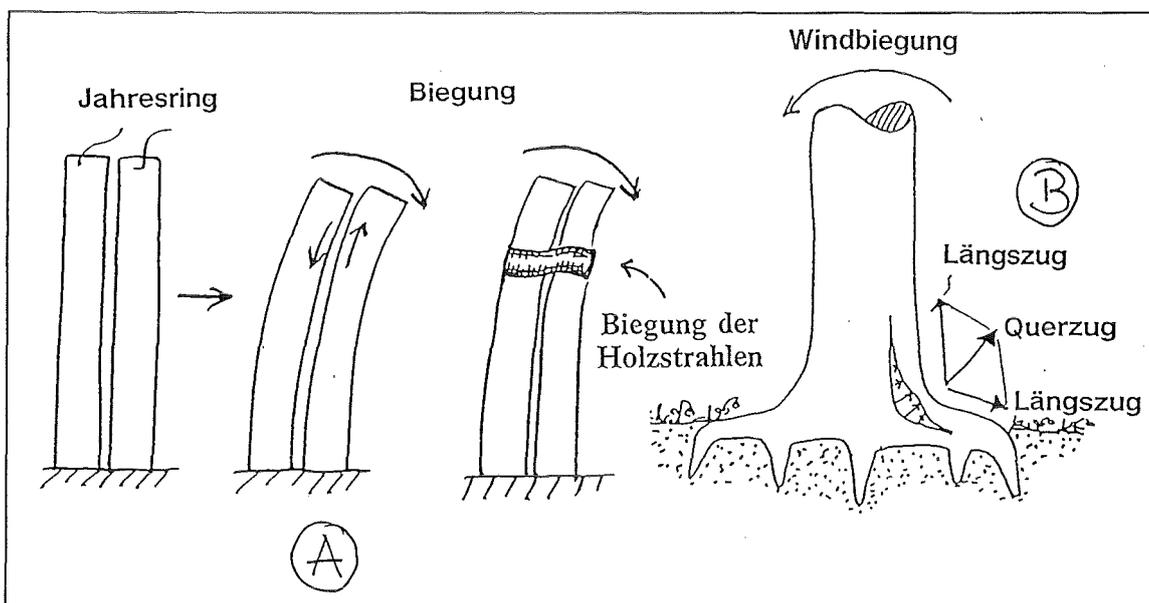


Abbildung 39: Durch Schub zwischen den Jahrringröhren werden die Holzstrahlen im geraden Stammbereich weitgehend auf Biegung belastet (A); im Bereich des Wurzelanlaufes hauptsächlich auf Zug (B). (Zeichnung: C. Mattheck)

Die unterschiedlichen Holzstrahlquerschnittsformen für Stamm- und Wurzelanlauf werden verständlich, sieht man sich deren unterschiedliche Belastungssituation einmal genauer an. Im krümmungsfreien Stamm werden die Holzstrahlen wegen Schubbelastung zwischen den Jahresringen vor allem auf Biegung beansprucht (Abb. 39 A). Die Holzstrahlen haben die Aufgabe die einzelnen Jahrringröhren gegeneinander zu verriegeln. Sie schützen damit das leichte, weithumige und wenig schubfeste Frühholz zwischen den dichteren Spätholzbereichen der Jahresringe vor übermäßiger Schubbelastung.

Im Wurzelanlauf werden die Holzstrahlen überwiegend auf radialen Zug belastet (Abb. 39 (B)). Sie verhindern in diesem Bereich die Delamination, also das radiale Abheben der *Jahrringröhren* voneinander. Aus der technischen Konstruktionslehre ist bekannt, daß bei Zugbelastung die Festigkeits-elemente zentral liegen sollen (Kabelbauweise), bei Biegebelastung dagegen peripher. Durch die gedrungene Form der Holzstrahl-Spindeln aus dem Wurzelanlauf versucht der Baum, die Holzstrahlzellen möglichst gleichmäßig um

den Zugmittelpunkt herum zu verteilen. Die langgestreckte Querschnittsform eignet sich wegen des erhöhten Widerstandsmomentes besonders gut als Verriegelungselement. Der Holzstrahl wird hochkant gebogen. Eine Kippung der schlanken Strahlen wird durch die ihn umgebenden Längsfasern zuverlässig verhindert. Positive Wachstumsspannungen in Umfangsrichtung unterbinden dabei die Reißinitiierung durch den Holzstrahl (DIETRICH & MATTHECK 1995).

Da die Holzstrahlen in Stamm und Wurzelanlauf unterschiedlichen mechanischen Belastungen unterliegen, denen sie jeweils gerecht werden müssen, sind auch ihre Geometrien unterschiedlich. Die mechanische Belastung steuert also die Querschnittsform der Holzstrahlen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Wird eine gekrümmte Struktur in der Weise belastet, daß sich ihr Krümmungsradius verringert, dann kommt es unweigerlich zu Querkzugspannungen. Diese haben im Innern ihr Maximum und sind an der Oberfläche Null. Diese Spannungen sind für das Delaminieren sog. Unglücksbalkenstrukturen verantwortlich.

Durch Vermessen der radialen Holzfestigkeiten mit einem Fractometer konnte an zahlreichen Bäumen eine Querfestigkeitsverteilung gefunden werden, die der berechneten Querkzugspannungsverteilung (unter Biegebelastung) gleicht. Bäume schützen ihren aus Fasern aufgebauten Holzkörper also durch eine an die Betriebsbelastung angepaßte Festigkeitsverteilung gegen Delamination. Dies gilt gleichermaßen für Laub- und Nadelhölzer sowie Bäume mit starker Zugholzformation.

Die Untersuchungen zur Querfestigkeit im weitgehend geraden Stammabschnitt im Vergleich zu den Festigkeiten, die in gekrümmten Abschnitten herrschen, ergaben 20 - 40% höhere Festigkeiten für den delaminationsgefährdeten Baumbereich.

Eine spezielle Betrachtung derjenigen Bohrproben, die durch das jeweilige Querbiegefestigkeitsmaximum verliefen, konnte zeigen, daß die Festigkeitserhöhung nicht durch einfache Anlagerungsprozesse erreicht werden kann. Ein solcher Vorgang hätte eine Festigkeitsverteilung entlang einer radial entnommenen Bohrprobe zur Folge, die einem Sägezahn ähnlich ist und nicht, wie gefunden, das Aussehen einer Glockenkurve hat. Der Baum muß also die Möglichkeit besitzen, seine inneren Festigkeiten lokal zu erhöhen und auch wieder in gleichem Maße zu erniedrigen.

Man kann als wesentliches Ergebnis dieser Arbeit eine spannungsgesteuerte Verteilung der radialen Biegefestigkeiten im Baum feststellen, auch wenn deren holzanatomische Erklärung noch weitgehend offen ist.

Mit einem theoretischen Baummodell konnte gezeigt werden, daß sich das Querkzugspannungsmaximum während unterschiedlicher Wachstumsphasen nicht am gleichen Ort im Wurzelanlauf befindet. Es verschiebt sich im gleichen Maße durch den Wurzelanlauf wie der Baum radial zuwächst. Das Maximum der σ_r -Verteilung befindet sich für dieses theoretische Baummodell bei allen Wachstumsschritten im Abstand von ca. 1/5 des dortigen Stammradius unterhalb der Baumoberfläche.

Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse kann eine noch unbekannte Materialanpassung gefordert werden, mittels deren der Baum in die Lage versetzt wird, seine Querfestigkeiten spannungsgesteuert zu verändern. Der Baum muß die Querfestigkeiten den im jährlichen Mittel herrschenden Belastungen anpassen können, um sich im Rahmen seiner Möglichkeiten gegen Faserdelamination, hervorgerufen durch Querkzugspannungen, zu schützen.

Erste einfache holzanatomische Untersuchungen konnten zeigen, daß die Querschnittsform der Holzstrahlen in Stamm und Wurzelanlauf an deren mechanische Belastungssituation angepaßt ist. Unter Berücksichtigung der speziellen inneren Architektur der Bäume sind die Holzstrahlen besonders geeignet, radial gerichtete Kräfte aufzunehmen. Es kann vermutet werden, daß über Ein- und Auslagerungsprozesse in den Zellen der Holzstrahlen die radialen Festigkeitsanpassungen im Baum realisiert werden. Hierüber

können letztendlich nur umfangreiche holzanatomische und holzanalytische Untersuchungen Klarheit schaffen. Diese sind notwendig, um die Wirkungsweise der Festigkeitsanpassung zu erkennen und zu verstehen.

In diese holzanatomischen Untersuchungen müßten dann auch Baumstrukturen mit einbezogen werden, die nicht wie der Wurzelanlauf von Anfang an über ihre wesentliche Belastungssituation Bescheid wissen, sondern erst im Laufe des Baumlebens zum *Un-glücksbalken* werden. Auf diese Weise könnte geklärt werden, wie das Kambium bei der Bildung der Holzstrahlen und die Strahlen selbst auf den Wegfall der Apikaldominanz oder überwiegend phototrop bestimmten Mäanderwuchs reagieren.

Die Untersuchungen und Fractometerstudien an hohlen Bäumen ergaben auch bei diesen Strukturen eine lastabhängige Festigkeitsverteilung. Die mit dem Fractometer gemessenen radialen Biegefestigkeitswerte waren im Bereich des Fäulebefalls höher als in vergleichbaren gesunden Bäumen mit Vollquerschnitt. Um eine quantitative Aussage über eine direkte Abhängigkeit der Festigkeiten entlang der Faulhöhle und dem Aushöhlungsgrad der Bäume zu erhalten, sind umfangreichere Messungen an hohlen Bäumen notwendig als sie in dieser Arbeit gemacht werden konnten. Hierdurch wäre dann eventuell eine auf nur zwei oder drei Zuwachsbohrungen gestützte Aussage über den Aushöhlungsgrad möglich. Oder es könnte bei bekanntem Aushöhlungsgrad eine Vorhersage bezüglich der zu erwartenden radialen Biegefestigkeitswerte gemacht werden. Im Rahmen von Standsicherheitsüberlegungen zu Risikobäumen und Baumgutachten könnten dann die gemessenen Werte direkt mit den *Sollwerten* verglichen und in die Baumbewertung miteinbezogen werden.

Bei den Spannungsberechnungen der einzelnen Baummodelle wurden die jeweiligen E-Moduli als konstant angenommen. Eine neben der Festigkeitsverteilung eventuell existierende E-Modulverteilung wurde nicht berücksichtigt. Die unterschiedlichen Biegebruchwinkel entlang der einzelnen Bohrkerne geben jedoch Grund zur Annahme, daß eine solche existiert. Es wäre durchaus wünschenswert, auch die Verteilung der E-Moduli zu kennen. Eine genauere und wirklichkeitsgetreuere FE-Modellierung der Baumabschnitte könnte somit erreicht werden. Hierbei könnten auch neue Erkenntnisse für den Aufbau und das Design von Faserverbundwerkstoffen gewonnen werden. Hochspezialisierte und extrem belastbare Faserkomponenten sind denkbar, die mit optimierter Faserorientierung, lastgerechter Festigkeitsverteilung und angepaßtem Elastizitätsmodul nach dem Vorbild der Natur entwickelt werden.

Ein vollständiges Verständnis der mechanischen Komponente Baum, seiner inneren Architektur sowie ein besseres Verständnis für den strukturellen Holzaufbau ist erst dann möglich, wenn sämtliche den Baum bestimmenden Festigkeiten im noch grünen Holzzustand meßbar sind. Neben der Scherfestigkeit sind dies unter anderem die Festigkeiten in Umfangs- und Längsrichtung. Zusammen mit Untersuchungen zur Eigenspannungsverteilung in Bäumen könnte dann ein geschlossenes Designkonzept abgeleitet werden. Dieses könnte nicht nur im Bereich der Bauteiloptimierung neue Akzente setzen, sondern auch zur eindeutigeren Beurteilung von sog. Gefahrenbäumen im Rahmen von Baumgutachten beitragen. Erst durch die genaue Kenntnis des Zusammenspiels der einzelnen Optimierungsstrategien kann eine abschließende Bewertung solcher Bäume erfolgen. Die Entwicklung neuer Holzdiagnosegeräte, die auf der Basis der radialen Zu-

wachsbohrung die Bestimmung weiterer Kenngrößen für grünes Holz im Feldversuch ermöglichen, wäre dafür äußerst wünschenswert.

Die Untersuchungen haben weiter gezeigt, daß es für die Herstellung optimierter Faser-verbundwerkstoffe nicht allein ausreichend sein kann, die Faserorientierungen nach den Hauptspannungstrajektorien auszurichten. Durch diesen Prozeß wird lediglich Schubspannungsfreiheit zwischen den einzelnen Fasern erzielt. Um frühzeitige Delamination einzelner Faserbündel zu verhindern, müssen auch die Querfestigkeiten derart verteilt werden, daß im Bereich hoher Spannungen hochbelastbares Material plaziert wird. Die Bäume sind uns auch auf diesem Gebiet meisterliche Vorbilder.

Insgesamt wäre es noch verfrüht zu behaupten, daß die Festigkeiten in biologischen Strukturen generell spannungsgesteuert verteilt sind. Eine Anpassung der radialen Festigkeiten an die Radialzugspannungen im Baum wurde im Rahmen dieser Arbeit aber glaubhaft gemacht.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit über die innere Festigkeitsoptimierung von Bäumen ermutigen, weitere biologische Strukturen auf eine optimierte Festigkeitsverteilung hin zu untersuchen. So wäre es interessant zu erfahren, ob auch Knochen und andere natürliche Lastträger den gleichen inneren Optimierungsprinzipien unterliegen.

9. Literatur

- ALBRECHT, W., MATTHECK, C., BETHGE, K. (1992) Unveröffentlichter Bericht des Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
- BEITZ, W., & KÜTTNER, K.-H. (1987) *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 16. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- BETHGE, K., MATTHECK, C., McDONALD, K., A., CRAMER, S., M. (1992) Unveröffentlichter Bericht des Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
- BETHGE, K., MATTHECK, C., ZIPSE, A. (1994) *Die Festigkeiten im Baum und ihre Bestimmung mit dem Fractometer II*. Neue Landschaft 12, 920- 926.
- BOSSHARD, H., H. (1984) *Holzkunde; zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*. Band 2, Birkhäuser Verlag, Basel.
- BRAUN; H., J. (1992), *Bau und Leben der Bäume*. 3. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg.
- BROCKHAUS (1987) *Brockhaus Enzyklopädie*. Bd. 3, 19. Auflage, F.A. Brockhaus GmbH, Mannheim.
- CURREY; J. (1984) *The mechanical adaption of bones*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- DEPARTMENT OF AGRICULTURE (1982) *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. Forest Service, Agricultural Handbook Nr. 72, Washington, USA.
- DIETRICH, F., & MATTHECK, C. (1995) *Cracks in Sabre-shaped Trees and Branches*. Journal of Theoretical Biology 173, 321- 327.
- ECKSTEIN, D. (1994) *private Mitteilung*.
- ECKSTEIN, D., & SAB, U. (1994) *Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation*. Holz als Roh- und Werkstoff 52, 279- 286.
- FEMVIEW (1991) *Femgen/ Femview User's Manual*. Femview Limited, Leicester, Großbritannien.
- FOSCHI, R., O. (1968) *Plane-stress problem in a body with cylindrical anisotropy, with special reference to curved Douglas-Fir beams*. Forest Branch Departmental Publication Nr. 1244. Forest Products Laboratory, Vancouver, Canada
- GERHARDT, H. (1993) *Computersimulation zum Wachstumsverhalten und zur Bruchmechanik von Bäumen*. Fortschr.- Ber. VDI Reihe 18, Nr. 149. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- GORDON, J., E. (1978) *Structures, or Why Things Don't Fall Down*. Penguin Books, London.

- GORDON, J., E. (1989) *Strukturen unter Stress: Mechanische Belastbarkeit in Natur und Technik*. Spektrum der Wissenschaft-Verlag, Heidelberg.
- GÖRLACHER, R., & HÄTTICH, R. (1994) *Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Bohrwiderstandsmessung*. Beitrag zum 1. Seminar: Baumuntersuchung - Holzprüfung, Heidelberg.
- HARTMANN, F. (1994) *Vergleich der radialen Festigkeits- und Spannungsverteilung bei Windbelastung für eine Esche mit Faulhöhle*. Diplomarbeit, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe.
- HIBBIT, D., CARLSSON, B., SORENSEN, P. (1989) *ABAQUS - User Manual, Version 4.8*. Providence, USA.
- IML (1994a) *Fractometer*. Produktinformation der Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Wiesloch/ Heidelberg.
- IML (1994b) *Resistograph Systeme*. Produktinformation der Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Wiesloch/ Heidelberg.
- JENKIN, C., F. (1926) *Report on materials of construction used in aircrafts*. Her Majesty's Stationary Office, London.
- JERONIMIDIS, G. & GORDON, J., E. (1974) *Work of fracture of natural cellulose*. Nature 252, 116.
- KEYLWERTH, R. (1951) *Spalten, Spaltbeanspruchung und Querfestigkeit des Holzes*. Holz als Roh- und Werkstoff 9, 1- 7.
- KOLLMANN, F. (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- KÖSTLER, J. (1968) *Die Wurzeln der Waldbäume: Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa*. Paul Parey Verlag, Hamburg.
- KRIECHBAUM, R. (1994) *Ein Verfahren zur Optimierung der Faserverläufe in Verbundwerkstoffen durch Minimierung der Schubspannungen nach Vorbildern der Natur*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- KRIECHBAUM, R., SCHÄFER, J., MATTHECK, C. (1992) *CAIO (Computer Aided Internal Optimization): A powerful method to optimize fiber arrangement in composite materials*. Proceedings of 1st European Conf. on smart Structures and Materials, 281- 284, EOS/SPIE and IOP Publishing Ltd, Glasgow.
- LAVERS, G., M. (1983) *The strength properties of timber*. Building Research Establishment Report, 3rd Edition, Her Majesty's Stationery Office, London.
- MATTHECK, C. (1990a) *Engineering Components Grow like Trees*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 21, 143- 168.
- MATTHECK, C. (1990b) *Why they grow, how they grow: the mechanics of trees*. Arboricultural Journal 14, 1- 17.

-
- MATTHECK, C. (1991) *Trees - The Mechanical Design*. Springer Verlag, Berlin.
 - MATTHECK, C. (1992a) *Die Baumgestalt als Autobiographie. Eine Einführung in die Mechanik der Bäume und ihre Körpersprache*. 2. Auflage, Thalacker Verlag, Braunschweig.
 - MATTHECK, C. (1992b) *Design in der Natur - der Baum als Lehrmeister*. Rombach Verlag, Freiburg.
 - MATTHECK, C. & BETHGE, K. (1992) Unveröffentlichter Bericht des Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
 - MATTHECK, C. & BETHGE, K. (1993) *Das Fractometer*. Allgemeine Forst Zeitschrift 3, 114- 115.
 - MATTHECK, C. & BRELOER, H. (1991) *Die Verkehrssicherungspflicht bei Bäumen in Praxis und Rechtsprechung*. Landschaftsarchitektur 5 (1991)- 2 (1992).
 - MATTHECK, C. & BRELOER, H. (1993) *Handbuch der Schadenskunde von Bäumen: Der Baumbruch in Mechanik und Rechtsprechung*. Rombach Verlag, Freiburg.
 - MATTHECK, C. & BURKHARDT, S. (1990) *A New Method of Structural Shape Optimization based on Biological Growth*. Int. Journal of Fatigue 12, 185- 190.
 - MATTHECK, C. & BURKHARDT, S. (1991) *Der Unglücksbalken - Biomechanik eines inneren Versagensmechanismus von Bäumen*. Allgem. Forst und Jagdzeitung 162, 170- 174.
 - MATTHECK, C. & PRINZ, M. (1991) Unveröffentlichter Bericht des Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
 - MATTHECK, C. & SCHWARZE, F., W., M., R. (1994) *Die Holzstrahlen als getarnte I-Balken in einem mechanischen Ersatzmodell für Holz*. Allgem. Forst und Jagdzeitung 10/ 11, 197- 201.
 - MATTHECK, C., ALBRECHT, W., DIETRICH, F., KRIECHBAUM, R. (1994a) *Die Biomechanik der Holzstrahlen*. Allgem. Forst und Jagdzeitung 8, 143- 147.
 - MATTHECK, C., BETHGE, K., WEST, P., W. (1994b) *Breakage of hollow tree stems*. Trees: Structure and Function 9, 47- 50.
 - MATTHECK, C., BETHGE, K., ZIPSE, A., BAUMGARTNER, A. (1994c) *Holz-Bruchfestigkeiten: Bestimmung mit dem Fractometer II*. Landschaftsarchitektur 4, 55- 57.
 - MATTHECK, C., BRELOER, H., BETHGE, K. (1994d) *Praktische Hinweise zur Verwendung des Fractometers*. Das Gartenamt 2, 96- 99.
 - MATTHECK, C., BRELOER, H., BETHGE, K., ALBRECHT, W., ZIPSE, A. (1995) *Use of the Fractometer to determine the strength of wood with incipient decay*. Erscheint demnächst im Journal of Arboriculture.

- MATTHECK, C., HUBER-BETZER, H., KEILEN, K. (1989) *Die Anpassung eines Baumes an die Kontaktbelastung durch einen Stein*. Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe GmbH, KfK 4526, Karlsruhe.
- MAYER, H. (1989) *Windthrow*. Phil. Trans. R. Soc., 267- 281, London.
- METZGER, C. (1893) *Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachstum der Bäume*. Mündener Forstliche Hefte, Drittes Heft, Julius Springer-Verlag, Berlin.
- NACHTIGALL, W. (1986) *Konstruktionen: Biologie und Technik*. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- NIEMZ, P. (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW Verlag, Leinfelden- Echterdingen.
- NOACK, D. & von ROTH, W. (1972) *Berechnung gekrümmter Brettschichtträger unter Belastung durch Momente, Normal- und Querkkräfte*. Holz als Roh- und Werkstoff 30, 220- 223.
- NORRIS, C., B. (1963) *Stresses within curved laminated beams of Douglas-Fir*. Forest Products Laboratory, Report FPL-020, Madison, Wisconsin, USA.
- RINN, F. (1989) *Eine neue Bohrmethode zur Holzuntersuchung*. Holz-Zentralblatt 115, 529- 530.
- RINN, F. (1991) *Direkte Messung der Holzdichte mit einer Bohrnadel*. Spektrum der Wissenschaften 4, 36- 42.
- RINN, F. (1992) *Möglichkeiten und Grenzen in der Anwendung des neuentwickelten Bohrgerätes zur Holzdichtemessung*. Das Gartenamt 2, 119- 121.
- SCHMIDT, R. (1994a) *Vergleich von gemessenen radialen Querfestigkeiten im Wurzelanlauf von Fichten mit berechneten radialen Spannungen*. Studienarbeit, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe.
- SCHMIDT, U. (1994b) *Vergleich von gemessenen Festigkeitsverteilungen mit berechneten Spannungsverteilungen an ausgewählten Bäumen*. Diplomarbeit, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe.
- SCHÖNENBERGER, W., SCHWEINGRUBER, F., H., MATTHECK, C. (1994) *Baumformen an der oberen Waldgrenze*. Bündnerwald 1, 35- 42.
- SCHWARZ, H., R. (1984) *Methode der finiten Elemente: Eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung der Rechenpraxis*. 2. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart.
- SCHWARZE, F., W., M., R. (1994) *Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzeretzenden Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro*. Dissertation, Institut für Forstbotanik und Baumpysiologie, Albert-Ludwig-Universität, Freiburg.
- SCHWEINGRUBER, F., H. (1990) *Anatomie europäischer Hölzer: Ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum-, Strauch- und Zwergstrauchhölzer*. Paul Haupt Verlag, Stuttgart.

-
- SHIGO, A., L. (1990) *Die neue Baumbiologie*. Thalacker Verlag, Braunschweig.
 - STRASBURGER, E. (1991) *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*. 33. Auflage, G. Fischer Verlag, Stuttgart.
 - SUUNTO (1993) *Gebrauchsanleitung für Zuwachsbohrer*. Produktinformation der Fa. Suunto, Schweden.
 - TESARI, I. (1995) *Vergleich zwischen Festigkeitsverteilungen und mittels FEM berechneten Spannungsverteilungen, sowie Festigkeitsverteilungen senkrecht und parallel zur Faserrichtung an grünen Hölzern*. Studienarbeit, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe.
 - TROLL, W. (1959) *Allgemeine Botanik*. Enke Verlag, Stuttgart.
 - WAGENFÜHR, R., & SCHEIBER, C. (1989) *Holzatlas*. 3. Auflage, VEB-Fachbuchverlag, Leipzig.
 - WALTHER, F. (1994) *Struktur und Formoptimierung hochbelasteter Bauteile - ein geschlossenes Konzept auf der Basis des Axiom konstanter Spannung*. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18, Nr. 146. VDI-Verlag, Düsseldorf.
 - YLIEN, A. (1952) *Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume*. Silva Fennica 76, Helsinki.