

# Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz

## Holzanatomische Voraussetzungen und mechanische Auswirkungen

### Current studies on primary failure in fresh wood – wood anatomical prerequisites and mechanical results

*von Andreas Detter, Klaus Richter, Catherina Rust und Steffen Rust*

#### Zusammenfassung

Wenn die Proportionalitätsgrenze auf Biegung überschritten wurde, sind auch bei einem nicht vollständig gebrochenen Baumstamm Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des grünen Holzes feststellbar. Auf der Druckseite des überlasteten Bereiches treten irreversible Verformungen auf, die den E-Modul parallel zur Faserrichtung herabsetzen. Eine mikroskopisch untersuchte Stauchungszone verlief in tangentialer Richtung als seitliches Ausknicken der Randfasern und war von Rissbildung und Verformungen in allen anatomischen Elementen des Holzes begleitet. Die Beeinträchtigungen können lebende Bäume aber durch Wulstholzbildung kompensieren. Dennoch stellt die Proportionalitätsgrenze eine sinnvolle Bemessungsgrenze für die Beurteilung der Bruchsicherheit von Bäumen dar, wenn hierfür rechnerische Verfahren eingesetzt werden.

#### Summary

Changes in the mechanical properties of the green wood fibres are observable if a tree stem has exceeded the limit of proportionality in bending, even before ultimate fracture occurs. The excess loading results in irreversible deformations on the compression side that reduce the Young's modulus in compression along grain. A compression zone studied with microscopes ran in a tangential direction as a sideways kinking and was characterized by crack formation and distortion in all anatomical elements of the wood. Living trees are able to compensate for those defects by formation of callus swellings or bulges ("Wulstholz"). Nevertheless, the limit of proportionality may serve as a reasonable threshold in numeric engineering approaches for assessing the safety of tree trunks against fracture.

## 1 Einleitung

Windeinwirkung ist die Hauptursache für das natürliche Versagen von Bäumen. Wenn ein Baum sich mit dem Wind biegt, entstehen auf der windzugewandten Seite des Stammes Zugspannungen, die eine Dehnung des Holzes bewirken. Auf der gegenüberliegenden windabgewandten Seite wird der Holzkörper aufgrund von Druckspannungen gestaucht. Eine zu hohe Windbelastung führt dazu, dass zunächst die Holzfasern auf der Druckseite versagen, da die Druckfestigkeit des Holzes nur halb so hoch ist wie seine Zugfestigkeit

(KOLLMANN 1951; BODIG & JAYNE 1982; NIEMZ 1993; WINANDY 1994; NATTERER et al. 2000). Dieses Ereignis wird oft als Primärversagen bezeichnet.

Durch das sukzessive Nachgeben der Druckseite verändert sich auch das Verhältnis von einwirkender Last und erreichter Stammbiegung: Die Krümmung nimmt bei gleichmäßig ansteigender Belastung ab diesem Punkt stärker zu (DETTNER & RUST 2013). Daher spricht man von der Proportionalitätsgrenze der Verformung. In der Mechanik wird sie als Überschreiten des Hook'schen Bereichs definiert. Der Stamm hat den

elastischen Bereich der Biegung verlassen, im Material treten viskoelastische und später plastische Verformungen auf. In der Folge steigen die Spannungen auf der Zugseite immer weiter an, bis auch dort die Belastbarkeitsgrenze erreicht wird und der Stamm – hörbar und sichtbar – versagt und bricht (NIKLAS & SPATZ 2012). Erreicht die Windeinwirkung zwar die Primärversagensgrenze, aber nicht die zum endgültigen Versagen erforderliche Last, können Bäume das entsprechende Sturmereignis überstehen ohne abzubrechen.

Für die Verwendung als Konstruktionsholz dürfen solche Stämme nicht herangezogen werden (ARNOLD & STEIGER 2007). Die Sortierung von Holz aus Windwurfflächen bereitet daher große Probleme, da die Überlastung der Fasern auf Druck nicht ohne Weiteres makroskopisch und auch mit zerstörungsfreien Methoden bei der Holzsortierung kaum erkennbar ist (SONDEREGGER & NIEMZ 2004). Im Laufe der Zeit bilden die Bäume aber vielfach sog. Wulstholz (TRENDELENBURG 1940) heraus, das als Hinweis auf Faserstauchungen dient (MATTHECK & BRELOER 1994).

In der Baumstatik spricht man von einem Primärversagen des Holzes, wenn der Holzkörper irreversibel verformt wird und sich die Elastizität des Stammes ändert (WESSOLLY & ERB 2014). Daher wird der Punkt des Primärversagens als Kriterium für die Abschätzung der Bruchsicherheit bei der Zugversuchsmethode verwendet (WESSOLLY 1991; SINN 2003). Ob tatsächlich eine Schwächung des Materials durch das Primärversagen eintritt und ob dies aus biologischer Sicht für Bäume bedeutsam ist, wird in der Fachwelt diskutiert. Ebenso stellt sich in Bezug auf die visuelle Kontrolle von Bäumen die Frage, ob die Wulstholzbildung tatsächlich als Hinweis auf eine verminderte Tragfähigkeit des Stammes oder vielmehr als Zeichen für eine erfolgreiche Kompensation der Faserstauchung zu werten ist. Dies wurde im Rahmen wissenschaftlicher Forschungen untersucht.

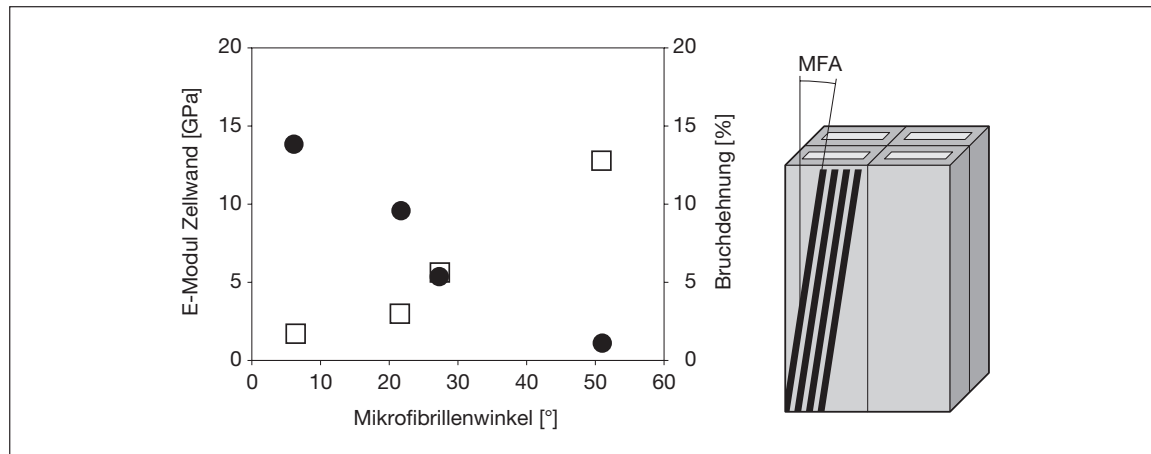
## 2 Festigkeitsbestimmende Elemente des Holzgewebes

### 2.1 Zellwandebene

Die Zellwände der Holzzellen sind komplexe, hierarchisch organisierte mehrlagige Strukturen, in im Laufe der Evolution an die sich ändernden Umweltanforderungen angepasst wurden (SALMEN & BURGERT 2009). Charakteristisches Merkmal verholzter Zellen ist die Ausbildung von sekundären Wandschichten, die auf die Primärwand aufgelagert werden, nachdem die sich differenzierenden Zellen ihre endgültige Form und Größe erreicht haben. Sekundärwände von normalen Holzzellen bestehen aus drei Schichten (S1, S2, S3), die durch ihre Schichtdicke, die relativen und absoluten Anteile der chemischen Makromoleküle und die Anordnung sowie Ausrichtung der parallel-orientierten Cellulosefibrillen relativ zur Zelllängsachse (Mikrofibrillenwinkel MFW) unterschieden werden. Während in der Primärwand die Cellulosefibrillen ungeordnet in einer Matrix aus Pektinen und Lignin eingebettet sind, nimmt der Ordnungsgrad der Fibrillen in den Sekundärwandschichten deutlich zu. Die MFW in der S1- und S3-Schicht sind überwiegend flach und wechseln in den beiden dünnen Schichten gegenläufig von Z- in S-Helix Anordnungen, während sie in der S2 Schicht in steilerem Winkel zur Zellachse angeordnet sind. Die Anordnung der Fibrillen in der S2 folgt einer Z-Helix in konzentrischen lamellaren Schichten.

Mikromechanisch ist unbestritten, dass die breite, ca. 80 % der Wanddicke von Zellen einnehmende Sekundärschicht S2, ihr MFW und die Wechselwirkung der Cellulosemoleküle mit den sie umgebenden Matrixpolymeren (Hemicellulosen und Lignin) für die Festigkeitseigenschaften der Zellen und der durch die Zellen gebildeten störungsfreien Holzgewebe verantwortlich sind (BURGERT 2006). Durch Anpassung des MFW bei der Synthese der S2 sind Bäume in der Lage, die mechanische Leistungsfähigkeit einzustellen oder zu kontrollieren. So reduziert ein zunehmender MFW die Zugsteifigkeit in Faserrichtung, bei gleichzeitig zunehmender Bruchdehnung (Abbildung 1).

So bilden z. B. junge Bäume Zellwände mit hohem Fibrillenwinkel aus, die den Stamm flexibel machen



**Abbildung 1: E-Modul der Zellwand (GPa) ● (berechnet auf Basis der relativen Dichte und der Zellwanddichte) und der Bruchdehnung (%) □ von Fichtenholz bestimmt im Zugversuch als Funktion des Mikrofibrillenwinkel (°). Messwerte aus einer Studie von REITERER et al. 1999, nach BURGERT 2006**

und die durch Windkräfte hervorgerufenen Spannungen abmindern, während bei älteren Bäumen die Steifigkeit der Zellen durch kleinere, d. h. steilere MFW zunimmt, um den hohen Biegemomenten bei Windeinwirkung zu widerstehen.

Wesentlich für das Verstehen der Eigenschaften der Zellwand ist zudem die Interaktion zwischen den relativ steifen Cellulosefibrillen (MOE 134 MPa) und den wesentlich duktileren Matrixpolymeren Hemicellulosen (Polyosen) und Lignin (MOE 40 MPa bzw. 2 MPa), die aber wissenschaftlich noch nicht im Detail bekannt ist (SALMEN & BURGERT 2009). Die Bindung zwischen der Cellulose und den Polyosen erfolgt über Wasserstoffbrücken, die flexibler sind als kovalente Bindungen. Das amorphe, Druckfestigkeit verleihende Lignin und die Hemicellulosen dagegen sind kovalent miteinander gebunden. Daher wird die Rolle der Polyosen auch als Mediator zwischen den vorwiegend kristallin geordneten sowie hydrophilen Cellulosefibrillen und dem hydrophoben Lignin bezeichnet.

Hemicellulosen beeinflussen u. a. das Kriechverhalten der Zellwand durch ihre viskoelastischen Eigenschaften und beeinflussen zentral das Feuchteverhalten der Zellwand. Aufgrund der Hygroskopizität der Holzzellwand werden in Abhängigkeit von der Umgebungfeuchte Hydroxylgruppen (OH<sup>-</sup>) in die Zellwände ein- bzw. ausgelagert. Unterhalb des Fasersättigungsbereichs (< ca. 30 % Holzfeuchte) nehmen alle me-

chanischen Festigkeitseigenschaften mit sinkender Holzfeuchte zu.

Zusätzlich zur Mikrostruktur der Zellwände und der Holzfeuchte ist für die Belastbarkeit von Holzgeweben die Rohdichte entscheidend. Zellenverbunde mit einer hohen Materialdichte, wie Spätholztracheiden bei Nadelbäumen oder Faserzellen bei Laubbäumen, sind demzufolge für die Festigkeit sowohl bei Zug- als auch bei Druckbelastung von essentieller Bedeutung.

### 2.2 Stammebene

Zusätzlich zu den oben genannten Kriterien und dem Prinzip einer hierarchisch organisierten Holzstruktur folgend wird die Festigkeit von Holz in makroskopischen Dimensionen (Schnitt-, Konstruktions-, Stammholz) durch die Anordnung und Verbindung der Zellgewebe untereinander, natürlich bedingte Abweichungen von der Vertikalausrichtung (z. B. Astbereiche, Schrägfasrigkeit bzw. Drehwuchs) und der Art, Größe und Richtung der Krafteinleitung bestimmt. Während für einzelne Laubholzfasern und Spätholztracheiden Zugfestigkeiten von 300 bis 600 N/mm<sup>2</sup> ermittelt werden, sinkt die Zugfestigkeit von Massivholz in Faserrichtung auf Werte zwischen 20 bis 180 N/mm<sup>2</sup>. Durch die erhöhte Holzfeuchte ist im Hinblick auf das Primärversagen von grünem Holz mit einer

weiteren Abminderung der numerischen Festigkeit und Steifheit zu rechnen.

Auf der Druckseite werden beim Versagen Stauchungen der in der Stammpерipherie angeordneten Holzzellwände hervorgerufen, die in der Folge als Stauchungszonen weitere Bereiche des Stammquerschnitts erfassen. Diese Stauchungszonen können, wenn kein Stammbruch eintritt, durch Harzbildung oder Kompartimentierung vor einem biologischen Befall geschützt werden. Windzugewandt kommt es nach bisherigem Verständnis bei Überschreiten der Längszugfestigkeit zu Querbrüchen in einzelnen Zellwänden und einem Ausbreiten der geschädigten Zone über eine Kombination von Scherversagen in den Mittelamellen sowie weiteren Faserquerbrüchen bis zum Gesamtversagen des Baumes durch die zunehmenden Biegespannungen. Ob die quer zur Stammrichtung angeordneten, insbesondere breiten Holzstrahlen einiger Laubholzarten mechanisch als Aussteifung oder bruchverstärkend wirken, ist unklar und sollte im Rahmen der vorgenommenen Studie mit untersucht werden.

### 3 Material und Methoden

In gängigen Prüfverfahren für Holz wird die Proportionalitätsgrenze in der Regel nicht bestimmt. Auch alle wissenschaftlichen Untersuchungen an stehenden Bäumen (z. B. KANE & CLOUSTON 2008) stellen bisher lediglich auf die maximale Biegebelastbarkeit des Stammes ab. Ob die so ermittelten Bruchspannungen für Sicherheitsüberlegungen geeignet sind, wird bezweifelt (WESSOLLY & ERB 2014). Die tatsächlichen Auswirkungen des Überschreitens der Proportionalitätsgrenze auf das Holz sind bislang wenig untersucht.

#### 3.1 Biegeversuche an Stämmen (Berg-Ahorn)

Im Winter 2013 wurden 10 defektfreie Stämme von Berg-Ahornen (*Acer pseudoplatanus*) mit etwa 6 m Länge und einem mittigen Durchmesser von ca. 35 cm in einem Forstbestand in der Umgebung Göttingens geschlagen und zur weiteren Untersuchung in das Labor der HAWK in Holzminden gebracht. Die Stäm-



**Abbildung 2: Versuchsaufbau 4-Punkt-Biegung.** Die Enden der Stämme wurden mit Lastkränen beidseitig mit ca. 5 m Abstand angehoben (rechts). Die Mitte des Stammes wurde von zwei Traversen (links) im Abstand von 90 cm nach unten gedrückt

me wurden kühl und feucht gelagert und innerhalb von sieben Tagen weiter untersucht. In einer eigens gebauten Prüfanlage wurden die Stämme in 4-Punkt-Biegeversuchen in Anlehnung an DIN 52 186 mit Hilfe von Kränen so weit als möglich belastet (Abbildung 2). Dabei trat lediglich in einem Fall das endgültige Versagen ein, die anderen Versuche wurden vorher abgebrochen.

Mit Hilfe von Standardmesstechnik für die Anwendung der Zugversuchsmethode (Hersteller argus electronics GmbH, Rostock) wurde das einwirkende Biegemoment und die hervorgerufene Verformung der Stämme konstant messtechnisch überwacht. Die Stammdurchbiegung zwischen den Auflagerstempeln wurde mit Hilfe von *Inclinometern* (Neigungsmesser, Messgenauigkeit 0,002°) aufgezeichnet. Zugleich ermittelten *Elastometer* (Dehnungsmesser, Messgenauigkeit 0,001 mm) die Verformung der Randfasern auf der Druckseite dieses Bereichs. Die etwa 2 m langen Teilstücke, die von den Kränen nach oben gezogen wurden und sich außerhalb der Druckstempel befanden, waren bei diesem Versuch geringeren Biegemomenten ausgesetzt als der innere Bereich von 90 cm Länge.

Die Kräne waren so gesteuert, dass sie die Enden der Stämme auf beiden Seiten mit gleichbleibender Ge-

geschwindigkeit anhaben. Damit war anhand der Aufzeichnung der einwirkenden Kräfte eine Veränderung der Stammdurchbiegung erkennbar. Ähnlich wie in anderen Prüfverfahren wurde das Erreichen der Proportionalitätsgrenze anhand der Abweichung vom linear-elastischen Verhalten des Stammes bestimmt (BURGERT et al. 2003; FARQUHAR & ZHAO 2006). Auch die Daten der Elastometer und Inclinometer zeigten in diesen Fällen im Teilstück zwischen den Stempeln eine solche Abweichung. Demnach war die Proportionalitätsgrenze überschritten worden, d. h. es war ein makroskopisch nicht erkennbares Primärversagen eingetreten.

### 3.2 Untersuchungen an Kleinproben

Nach dem Biegeversuch wurden die Stämme in Teilstücke mit je 30 cm Länge zersägt, deren Enden gegen Austrocknung mit Paraffin versiegelt wurden. Die Abschnitte, die aus dem Bereich zwischen den Stempeln stammten, waren im Versuch gleichmäßig dem maximalen Biegemoment ausgesetzt (mittleres Segment). Die beiden Segmente außerhalb der Druckstempel wurden in diesem Versuchsaufbau geringer belastet. Daher konnte davon ausgegangen werden, dass Versagensprozesse nur in den Teilstücken aus dem mittleren Segment stattgefunden hatten.

Aus der Druck- und Zugseite aller Teilstücke wurden Kleinproben geschnitten und auf die exakten Abmessungen  $b:20 \times h:20 \times l:50 \text{ mm}^3$  gebracht. Dabei wurde sichergestellt, dass die Längsachse der Probe exakt der Faserrichtung entsprach. Das Frischgewicht der Proben wurde ermittelt und die Proben bis zur Untersuchung bei  $-15^\circ \text{ C}$  gelagert, um eine Austrocknung zu verhindern.

Die Proben wurden mit einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick (Typ Z050) im Druckversuch gemäß DIN 52185 auf ihre mechanischen Eigenschaften überprüft. In einem zerstörungsfreien Versuch wurde die Stauchung unter Last mit Hilfe von Wegaufnehmern am Prüfkörper gemessen und der E-Modul ermittelt. Beim Druckversuch bis zum Versagen wurden Kraft und Traversenweg aufgezeichnet und die maximale Druckfestigkeit sowie die Spannung beim Erreichen der Proportionalitätsgrenze errechnet. Die Prüf-

geschwindigkeit wurde vergleichsweise hoch gewählt (10 mm/min), da im natürlichen Wind ebenfalls von kurzzeitigen Spitzenbelastungen ausgegangen werden kann (JAMES et al. 2006). Nach den Versuchen wurden die Proben gedarrt und die Darrdichte ermittelt.

Die beim Zuschnitt verbliebenen Teile der Druckseite des belasteten Bereichs (mittleres Segment), in dem beim Biegeversuch die Proportionalitätsgrenze nachweislich erreicht worden war, wurden weiterhin bei  $-15^\circ \text{ C}$  gelagert. Später wurden aus den Randfasern Kleinproben mit den Abmessungen  $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$  entnommen und zunächst lichtmikroskopisch untersucht. Eine dabei gefundene Knickzone wurde daraufhin mit dem Elektronen-Rastermikroskop (Zeiss, EVO 40) stärker vergrößert und analysiert.

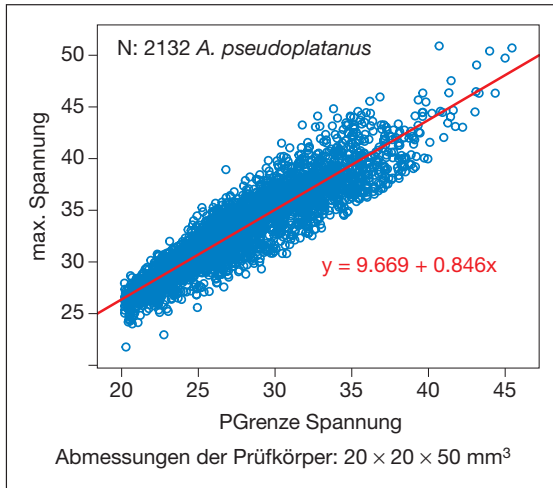
## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Belastung bei Primärversagen und beim endgültigen Bruch

Die Proportionalitätsgrenze grünen Holzes wurde von JESSOME (1977) an Kleinproben von 54 Baumarten unter axialer Druckbelastung untersucht. Dabei wurde die Proportionalitätsgrenze im Mittel bei etwa 50 % der maximalen Festigkeit überschritten. Demnach fand an diesen Kleinproben eine ausgeprägte plastische Verformung statt, bevor das endgültige Versagen eintrat. Nach SPATZ & PFISTERER (2013) lassen diese Daten den Schluss zu, dass das endgültige Versagen gegenüber der Proportionalitätsgrenze bei etwa doppelt so hoher Belastung auftritt. Von dieser einfachen Regel weichen die Ergebnisse unserer Versuche deutlich ab.

Bei den feuchten Kleinproben der untersuchten Baumart Berg-Ahorn war nach dem Erreichen der Proportionalitätsgrenze im Mittel nur noch eine Lasterhöhung von 10 bis 30 % erforderlich, um den endgültigen Versagenspunkt zu erreichen (Abbildung 3). Ähnlich geringe plastische Anteile wurden im Rahmen anderer Untersuchungen an stark ausgehöhlten Bäumen gefunden. Hier trat teilweise bereits kurz nach dem Erreichen der Proportionalitätsgrenze das endgültige Versagen auf, weil sich nach dem Stauchen der Randfasern tangentielle Risse in der Restwand bil-





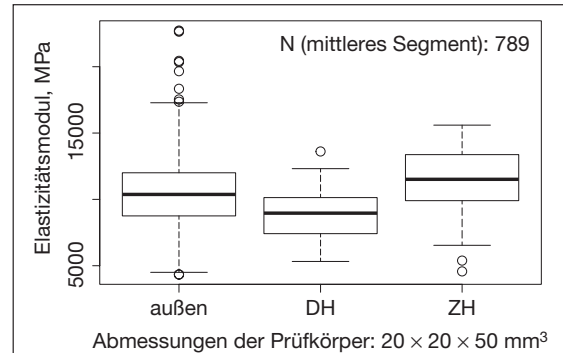
**Abbildung 3:** Bei Kleinproben ( $20 \times 20 \times 50 \text{ mm}^3$ ) erfolgte unter Druckbelastung parallel zur Faser das endgültige Versagen bereits bei einer 1,1- bis 1,3-fachen Überschreitung der Proportionalitätsgrenze (Werte in MPa)

deten (DETTNER 2010; NOVAK 2014). Auch bei den vorliegenden Versuchen brach ein intakter Stamm nach dem Überschreiten der Proportionalitätsgrenze bereits bei einer Erhöhung der Biegebelastung um 30 %.

#### 4.2 Materialeigenschaften der überlasteten Randfasern

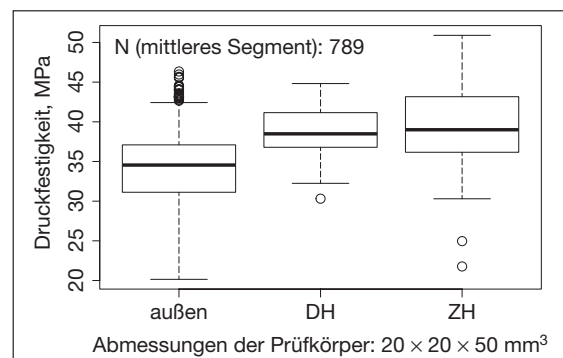
Kleinproben, die aus der Druckseite des am stärksten belasteten mittleren Segments der bis zum Primärversagen gebogenen Stämme entnommen wurden, zeigten gegenüber der Zugseite und den beiden äußeren Segmenten einen signifikant verringerten E-Modul (Abbildung 4). Dies deckt sich mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen (TRENDELENBURG 1940; SONDEREGGER & NIEMZ 2004; ARNOLD & STEIGER 2007) und deutet auf eine partielle Beschädigung mechanisch versteifend wirkender Bestandteile des Holzes hin. Bereits wenn sich in der Probe nur wenige einzelne Stellen mit Faserknicken befinden, wäre es denkbar, dass sie sich über ihre Gesamtlänge im Prinzip wie eine Ziehharmonika verhält.

Demgegenüber setzte das endgültige Versagen der Proben aus dem mittleren Segment sowohl auf der Druck- als auch Zugseite erst bei signifikant höherer



**Abbildung 4:** E-Modul von Kleinproben auf Druck parallel zur Faser. Auf der Druckseite des mittleren Segments (DH) sind die Werte signifikant gegenüber der Zugseite dieses Segments (ZH) und den weniger belasteten Teilen (außen) vermindert

ren Druckspannungen ein (Abbildung 5). Dies wäre zumindest hinsichtlich der überlasteten Fasern auf der Druckseite durch einen als Komprimierung (im Englischen *densification*) bezeichneten Vorgang erklärbar. Ähnliche Effekte wurden für grünes Holz bereits beschrieben (ENNOS & CASTEREN 2010) und treten auch bei anderen Festkörpern mit Gitterstruktur auf (GIBSON & ASHBY 1999). Zudem ist Holz kein homogenes Material gleicher Festigkeit. Infolge von Festigkeitsunterschieden innerhalb des grünen Holzes wäre es denkbar, dass beim Primärversagen die schwächsten



**Abbildung 5:** Druckfestigkeit von Kleinproben parallel zur Faser. Die Festigkeit im mittleren Segment ist gegenüber den äußeren Stammsegmenten (außen) signifikant erhöht. Druck- (DH) und Zugseite (ZH) sind nicht signifikant verschieden

## 2 Baumdiagnose

ten Fasern einknicken, während die verbliebenen eine höhere Festigkeit aufweisen.

Allerdings entspricht die erhöhte Druckbelastbarkeit im mittleren Segment auch einem Dichtetrend des Holzes der verschiedenen Segmente. Gegenüber den äußeren Segmenten war die Dichte der Kleinproben im mittleren Segment durchschnittlich um etwa 3 % (Druckseite) bis 4,5 % (Zugseite) erhöht. Dichteunterschiede können jedoch nicht die Verringerung des E-Moduls auf der Druckseite des überlasteten Bereichs erklären, da diese entgegengesetzt zu den Abweichungen der Dichte verläuft. Die größere Nachgiebigkeit der Proben ist demnach Veränderungen in der Holzstruktur zuzuschreiben, die beim Überschreiten der Proportionalitätsgrenze aufgetreten sind.

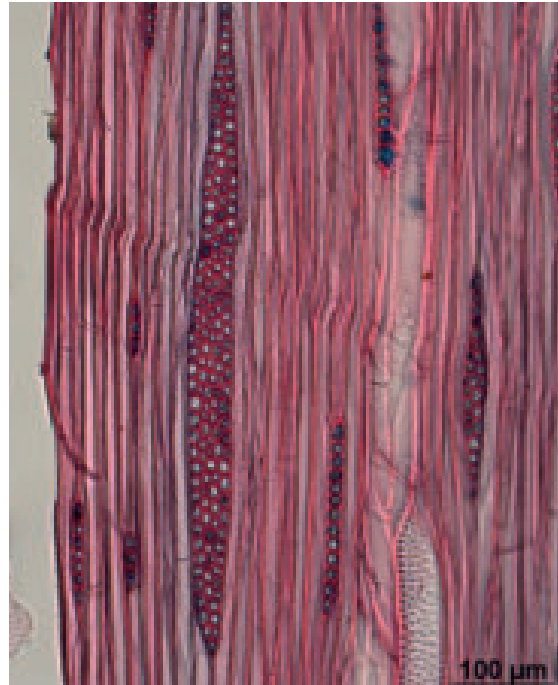
### 4.3 Mikroskopische Untersuchungen

Aus diesem Grund wurden mikroskopische Untersuchungen am Lehrstuhl für Holzwissenschaft der TU München durchgeführt. Dabei waren plastische Verformungen der Randfasern nur sehr schwer auffindbar. Bei den über 100 untersuchten Proben wurde lediglich eine Stauchungszone identifiziert. Bereits bei einer 100-fachen Vergrößerung war im Längsschnitt lichtmikroskopisch ein Ausknicken der Fasern in tangentialer Richtung erkennbar. Die Stauchungszone verlief in einem Winkel von etwa 60 bis 70° zur Faserichtung und erstreckte sich über Holzfasern, großlumige Gefäße sowie Holzstrahlgewebe (Abbildung 6).

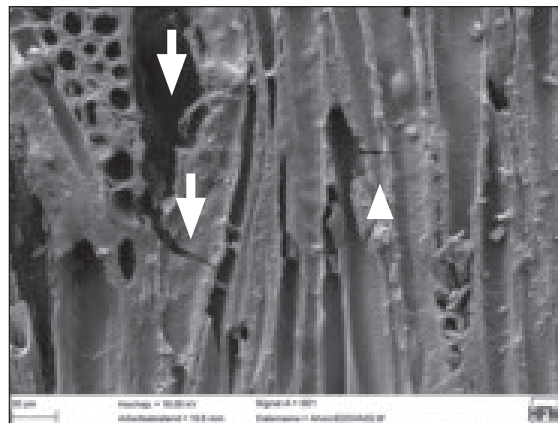
Bei der weiteren Untersuchung der Probe mit Hilfe des Elektronen-Rasterelektronenmikroskops wurden folgende Versagensformen festgestellt:

- Axiale und transversale Rissbildung in den Holzstrahlen und der S2-Schicht der Faserzellwände (Abbildung 7)
- seitliches Ausknicken der Faser- und Gefäßzellwände (Abbildung 8)
- Auffalten der Gefäßwände (Abbildung 9).

Diese irreversiblen Veränderungen der holzanatomischen Struktur ähneln dem Erscheinungsbild von Holzproben, die bis zur maximalen Druckfestigkeit belastet wurden. Solche Prüfkörper zeigen

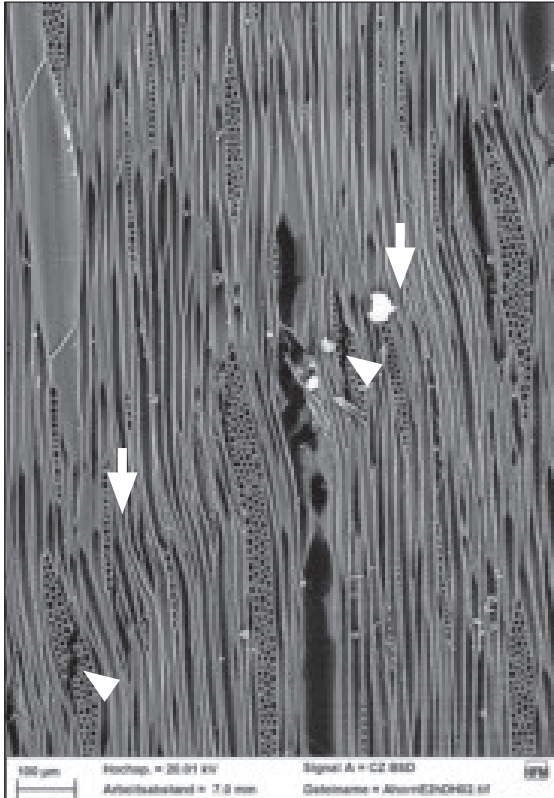


**Abbildung 6: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Stauchungszone, Verlauf von oben links nach Mitte rechts, Tangentialschnitt**

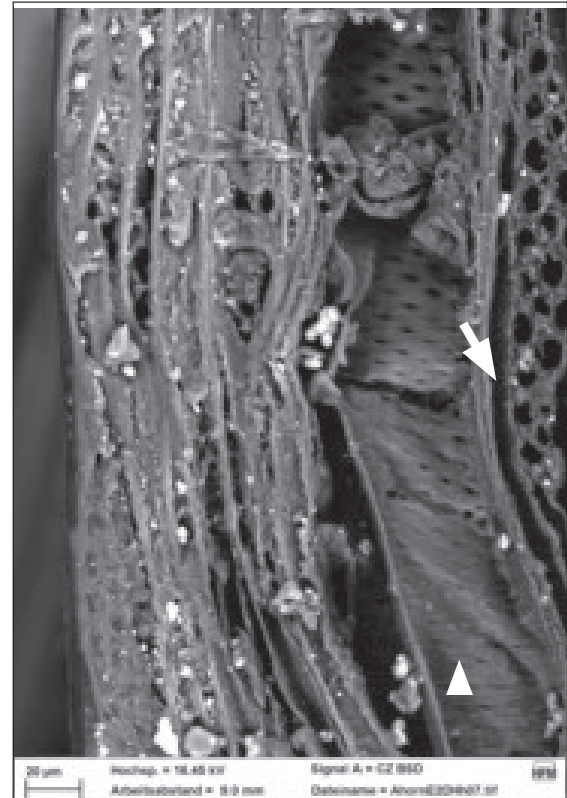


**Abbildung 7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme. Rissbildung am Ende eines Holzstrahls (Blockpfeile) und durch eine Holzfaser (Spitzpfeil), Tangentialschnitt**

in der Regel eine s-förmige Faltung der Fasern und ein seitliches Ausknicken des Faserverlaufs (z. B. bei BODIG & JAYNE 1982; TERZIEV et al. 2005). Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch innerhalb des geschlossenen Holzkörpers des Stammes beim Pri-



**Abbildung 8:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme. Stauungszone (von rechts oben nach links unten). Rissbildung in Holzstrahlen (Spitzpfeile) bei seitlichem Ausknicken des Faserverlaufs (Blockpfeile), Tangentialschnitt



**Abbildung 9:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Auffalten der dünnen Wand eines Frühholzgefäßes in der Knickzone (Spitzpfeil) und Delamination der Holzstrahlwand (Blockpfeil), Tangentialschnitt

märversagen ein seitliches Weggleiten der tragenden Elemente erfolgt. Dabei entstehen in den mehrreihigen Holzstrahlen durch Rissbildung an Zellenwänden große Zwischenräume (Abbildung 7).

Dass die Festigkeit des Holzstrahlengewebes maßgeblich für den Beginn des Primärversagens sei, erscheint jedoch noch nicht unbedingt schlüssig. So knickten die Holzfasern im Bereich der Holzstrahlen nicht nach beiden Seiten aus wie teils vermutet wurde (MATTHECK & KÜBLER 1997), sondern wurden infolge der seitlichen Verschiebung aufgespreizt (Abbildung 8).

Die Überwindung der Drucksteifigkeit der aus den Holzfasern gebildeten Gitterstruktur könnte das seitliche Ausknicken eingeleitet haben (vgl. Modelle bei GIBSON 2005). Da die Querkzugfestigkeit der Holz-

strahlen vermutlich gering ist, wäre ihr Versagen ähnlich zu beurteilen wie das spiralförmige Auffalten und seitliche Einknicken der dünnen Wände großlumiger Frühholzgefäße. Diese tragen wenig zur Festigkeit des Holzes bei. Sie werden aber dennoch besonders stark verformt, wenn der Versagensprozess einsetzt (Abbildung 9).

## 5 Zusammenfassung

Die eingangs gestellten Fragen zielten auf die Bedeutung des Primärversagens grünen Holzes stehender Stämme für die Baumbiologie, die visuelle Kontrolle der Verkehrssicherheit und die Abschätzung von Sicherheitsreserven durch die ingenieurtechnischen Ansätze der Baumstatik. Nachfolgend sollen die Er-



gebnisse der vorliegenden Untersuchung herangezogen werden, um diese Fragen soweit als möglich zu beantworten.

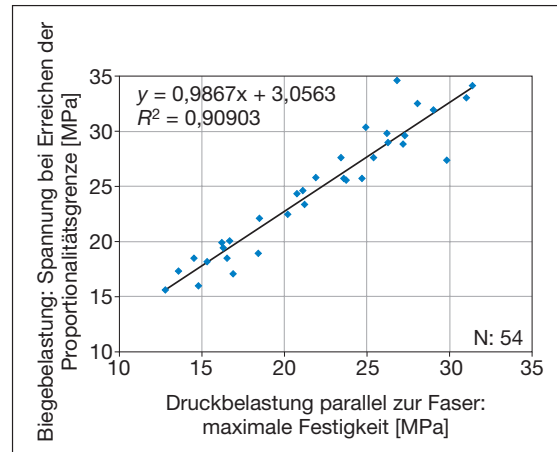
### **Ergibt sich die Proportionalitätsgrenze unter Biegung aus der maximalen Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser?**

Die mikroskopisch erkennbaren Schäden ähneln dem Erscheinungsbild von endgültig versagten Druckproben. Daher lässt sich vermuten, dass die Proportionalitätsgrenze der Biegebelastbarkeit eines Stammes genau dann überschritten wird, wenn die Holzfasern auf der Druckseite versagen. Beim Druckversagen von Kleinproben sind oft nur geringe Traglastreserven im plastischen Bereich vorhanden (HORACEK & PRAUS 2001; WESSOLLY & ERB 2014). Demnach können einzelne Faserbereiche auf der Druckseite nacheinander, aber in rascher Folge ausknicken, wodurch sich die Nachgiebigkeit des Stammes als Gesamtstruktur graduell erhöht.

Der Katalog mechanischer Eigenschaften grünen Holzes von JESSOME (1977) unterstützt diese These. Die Datenanalyse der Mittelwerte einer großen Anzahl von Bäumen zeigt einen sehr engen, nahezu 1:1-Zusammenhang zwischen maximaler Druckfestigkeit parallel zur Faser und der Proportionalitätsgrenze unter Biegebelastung (Abbildung 10). Daraus lässt sich ableiten, dass die Druckfestigkeit in Faserrichtung zur Beurteilung der Bruchsicherheit von Bäumen geeignet ist. Bislang wurde aber noch nicht der Nachweis erbracht, dass dieser Zusammenhang auch für den Einzelbaum gilt. Aufgrund der Schwankungsbreite individueller Materialeigenschaften innerhalb eines Baumes und zwischen Bäumen einer Art muss die Korrelation nicht notwendigerweise eine Kausalität bedeuten.

### **Kann das Primärversagen auch infolge anderer mechanischer Prozesse im Stamm auftreten?**

Bei stark ausgehöhlten Querschnitten gehen viele Autoren davon aus, dass andere Versagensarten den Bruch auslösen. Durch die Verflachung eines Hohlrohrs entstehende tangentielle Zugrisse leiten nach MATTHECK (2002) den Bruch ein. Auch primäre Rissbildung durch Schubversagen wird aufgrund theoretischer



**Abbildung 10: Über zahlreiche Kleinproben vieler Baumarten ergibt sich ein enger 1:1-Zusammenhang zwischen der maximalen Druckfestigkeit in Faserrichtung (horizontale Achse) und der Proportionalitätsgrenze bei Biegebelastung (vertikale Achse), Datenquelle: JESSOME 1977**

tischer Berechnungen als ursächlich für den Bruch ausgehöhlter Stämme bezeichnet (MATTHECK et al. 2006). Diese Analysen beruhen auf Betrachtungen bereits versagter Baumstämme und rechnerischen Modellen, denen meist ideale Kreisquerschnitte aus homogenem Material zugrunde gelegt werden.

Bei aktuellen Untersuchungen an der BOKU in Wien (NOVAK 2014) wurden 24 stehende Bäume mit Restwandstärken im Bereich von 1/4 bis 1/20 des Radius unter laufender messtechnischer Überwachung mit hochauflösenden Instrumenten bis zum Bruch belastet. Dabei wurden keine Hinweise darauf gefunden, dass vor dem Versagen der druckseitigen Randfasern eine Rissbildung im Querschnitt erfolgt. Diese wurde vielmehr stets erst nach dem Primärversagen durch Faserstauchen aufgezeichnet.

Bei Ästen treten spontane Brüche auf, deren Verlauf bislang ungeklärt ist (WEIHS 2014). Ob hier das primäre Versagen auf der Druckseite erfolgt oder ob Rissbildung oder Veränderungen der Materialeigenschaften auf der Zugseite stattfinden, lässt sich derzeit noch nicht endgültig beurteilen. Hierzu wurden bereits Forschungsarbeiten begonnen. Ebenso wird der Versagensverlauf nach oben gekrümmter Äste (sog. Unglücksbalken), an denen vielfach Stauchungszonen

auftreten, kontrovers interpretiert. Die theoretischen Betrachtungen von MATTHECK (1992) gehen davon aus, dass der Versagensprozess durch die Bildung von Delaminationsrissen ausgelöst wird. Andere Autoren stellen die Spaltung als Folge der Komprimierung der Fasern auf der Druckseite dar (ENNOS & CASTEREN 2010). Eine messtechnische Aufzeichnung des Versagensprozesses ist uns bislang nicht bekannt.

### **Sollte Wulstholzbildung als Defektsymptom eingestuft werden?**

Zunächst ist es in der Praxis nicht problemlos möglich, Wulstholz oder Knickleisten als Resultat eines Primärversagens (ARNOLD 2003) von anderen Formen der Wulstbildung zu unterscheiden. Für die lokale Bildung von Wucherungen oder Gewebewülsten können rein anatomische Gründe verantwortlich sein, so z. B. schlafende Knospen bei Eiche oder Linde. Vielfach als Stauchungen angesprochene Faltungen der Rinde treten arttypisch auf und sind kein Hinweis auf Defekte im Holzkörper (DUJESIEFKEN et al. 2005). Nachweislich kann auch das Phytohormon Ethylen Veränderungen in der Holzanatomie hervorrufen und – in hohen Konzentrationen – zur Bildung ungewöhnlicher Strukturen im Xylem führen (NELSON & HILLIS 1978). Borkenfaltungen können auch auf der Unterseite von Astansätzen oder am Stammfuß vieler Baumarten auftreten. Wenn sich die Astanbindung bzw. der Wurzelanlauf verstärken, verringert sich durch den starken Zuwachs der Krümmungsgrad immer weiter (Ennos 1995) und es entsteht aus rein geometrischen Gründen in den konkav gekrümmten Randbereichen zunehmender Platzmangel. Dadurch können sich in den äußersten Gewebeschichten Faltungen der Rinde und des Xylems bilden.

Aus der Praxis der Baumdiagnose liegen nach unserer Kenntnis bislang keine Nachweise für eine verminderte Bruchsicherheit im Bereich von Wulstholz vor. Der endgültige Bruch von Fichtenholz mit Knickzonen erfolgt zwar spröder (ARNOLD & STEIGER 2007), in der Natur findet er aber gar nicht immer in den Stauchungszonen statt (MERGEN 1954). Das Schadpotenzial streifenartiger Knickzonen, die sich nach einem Primärversagen ausbilden, wird in der Literatur meist als gering eingestuft, da sie eine Kompensation des Schadens anzeigen (MATTHECK & BRELOER 1994;

WESSOLLY & ERB 2014). Insofern hat Wulstholzbildung keine besondere Bedeutung bei der visuellen Untersuchung der Verkehrssicherheit.

### **Ist die Proportionalitätsgrenze eine sinnvolle Grenze für die Beurteilung der Bruchsicherheit?**

Aus der vorliegenden Untersuchung lässt sich nicht ableiten, dass das Überschreiten der Proportionalitätsgrenze im Sturm eine verminderte Bruchsicherheit zur Folge hat. Zwar ist die Nachgiebigkeit an der geschädigten Stelle infolge des Primärversagens erhöht (verminderter E-Modul). Eine höhere Flexibilität von Bäumen wird jedoch vielfach als positive Eigenschaft eingestuft, da sie zur Reduktion der Windlast beitragen kann und die Gefahr des spröden Materialversagens abmindert (YLINEN 1954; MAYER 1987; WESSOLLY 1989; JAMES et al. 2006). Die Druckbelastbarkeit der Fasern wurde in unseren Versuchen durch das Primärversagen offenbar nicht herabgesetzt. Gleichwohl bleibt zu vermuten, dass die Zugfestigkeit beeinträchtigt wird. Bei Biegeversuchen mit Fichtenholz, das infolge einer Überlastung im Orkan Stauchungszonen enthielt, war die Bruchspannung im Mittel um weniger als 15 % vermindert (ARNOLD & STEIGER 2007).

Solche Einbußen können mit vergleichsweise geringem Energieaufwand kompensiert werden, wenn der Baum nach dem Primärversagen den Durchmesser des geschädigten Bereichs durch Zuwachs vergrößert (LARJAVAARA & MULLER-LANDAU 2010). Der Baum ist nach der Bildung von Reaktionsholz wieder in der Lage, eine ähnliche große Windeinwirkung zu überstehen, die zuvor das Überschreiten der Proportionalitätsgrenze bewirkt hatte.

Dennoch wurde in vorliegender Untersuchung nachgewiesen, dass sich die Elastizität der Randfasern und das Biegeverhalten des Stammes mit dem Überschreiten der Proportionalitätsgrenze verändern. Dies führt dazu, dass der Vorgang nach ingenieurtechnischen Maßstäben als kritisch für den Baum als Struktur eingestuft wird, auch wenn er seine biologische Funktionsfähigkeit behält und seine Bruchsicherheit im Laufe der Zeit wieder aufbauen könnte.

Rechnerische Abschätzungen der Verkehrssicherheit sind ohnehin nur durch diese Betrachtungsweise

möglich, da seriöse Hochrechnungen sich auf den linear-elastischen Bereich beschränken müssen. Belastbare Aussagen zum Punkt des endgültigen Versagens, also über die Proportionalitätsgrenze hinaus, lassen sich insbesondere bei vorgeschädigten Bäumen nach den vorliegenden Erkenntnissen daraus nicht ableiten.

### Dank

Den niedersächsischen Landesforsten und den Mitarbeitern an der HAWK Göttingen Hildesheim und der TU München danken wir für die wertvolle Unterstützung. Das Projekt wurde gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Fördernummer FKZ 17021X11).

### Literatur

- ARNOLD, M., 2003: Compression Failures in Wind-damaged Spruce Trees. In: Proceedings of the International Conference Wind Effects on Trees, Karlsruhe, 253–260.
- ARNOLD, M.; STEIGER, R., 2007: The influence of wind-induced compression failures on the mechanical properties of spruce structural timber. *Materials and Structures* 40, 57–68.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A., 1982: *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- BURGERT, I., 2006: Exploring the micromechanical design of plant cell walls. *American Journal of Botany* 93(10), 1391–1401.
- BURGERT, I.; ROHR, C.; FRÜHMANN, K.; STANZL-TSCHEGG, S. E., 2003: Mechanical Properties of bottom compression side of branches of beech (*Fagus sylvatica* L.). 4th International Plant Biomechanics Conference. East Lansing MI, USA.
- DETTNER, A., 2010: Assessment of the Strength of Tree Stems Compromised by Decay. Primary Research Report. ISA Tree Biomechanics Research Week Ohio (unveröffentl.)
- DETTNER, A.; RUST, S., 2013: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2013*. Haymarket Media, Braunschweig, 87–100.
- DUJESIEFKEN, D.; JASKULA, P.; KOWOL, T.; WOHLERS, A., 200: Baumkontrolle unter Berücksichtigung der Baumart. *Thalacker Medien, Braunschweig*, 296 S.
- ENNOS, A. R., 1995: Development of buttresses in rainforest trees: the influence of mechanical stress. In: COUTTS, M. P., GRACE, J. C. (Hrsg.). *Wind and trees*. 293–301.
- ENNOS, A. R., VAN CASTEREN, A., 2010: Transverse stresses and modes of failure in tree branches and other beams. *Proc Roy Soc Lond B* 277, 1253–1258.
- FARQUHAR, T.; ZHAO, Y., 2006: Fracture mechanics and its relevance to botanical structures. *American Journal of Botany* 93, 1449–1454.
- GIBSON, L. J., 2005: Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics* 38, 377–399.
- GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F., 1999: *Cellular Solids Structure and Properties*. Cambridge Solid State Science Series. University of Cambridge.
- HORÁČEK, P.; PRAUS, L., 2001: Mechanical properties of Norway maple (*Acer platanoides* L.) wood at different moisture and physiological activity. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 49 (5) p. 135–148.
- JAMES, K.; HARITOS, N.; ADES, P. K., 2006: Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany*, 93 (10), 1522–1530.
- JESSOME, A. P., 1977: *Strength and Related Properties of Woods Grown in Canada*. Forestry Technical Report. Eastern Forest Products Laboratory, Ottawa.
- KANE, B.; CLOUSTON, P., 2008: Tree Pulling Tests of Large Shade Trees in the Genus *Acer*. *Urban Forestry & Urban Greening* 34 (2), 101–109.
- KOLLMANN, F., 1951: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. Auflage, Springer Verlag.
- LARJAAARA, M.; MÜLLER-LANDAU, H. C., 2010: Rethinking the value of high wood density. *Functional Ecology* 24, 701–705.
- MATTHECK, C., 1992: *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*. Rombach, Freiburg.
- MATTHECK, C., 2002: *Tree Mechanics*. Karlsruhe.
- MATTHECK, C.; BETHGE, K.; TESARI, I., 2006: Shear effects on failure of hollow trees. *Trees – Structure and Function* 20, 329–333.
- MATTHECK, C.; BRELOER, H., 1994: *Handbuch der Schadenskunde von Bäumen*, Rombach Wissenschaft; Reihe Ökologie. Rombach, Freiburg im Breisgau.
- MATTHECK, C.; KUBLER, H., 1997: *Wood: the internal optimization of trees*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- MAYER, H., 1987: Wind-introduced tree sways. *Trees – Structure and Function* 1, 195–206.
- MERGEN, F., 1954: Mechanical aspects of wind-breakage and wind-firmness. *Journal of Forestry* 52, 119–125.
- NATTERER, J.; SANDOZ, J. L.; MARTIAL, R., 2000: *Construction en bois, Traité de Génie Civil*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland.
- NELSON, N. D.; HILLIS, W. E., 1978: Ethylene and Tension Wood Formation in *Eucalyptus gomphocephala*. *Wood Science and Technology* 12: 309–315.
- NIEMZ, P., 1993: *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Holz. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen.
- NIKLAS, K. J.; SPATZ, H.-C., 2012: *Plant Physics*. The University of Chicago Press, Chicago.
- NOVAK, R., 2014: Überprüfung des Stammversagens hohler Baumstämme anhand von Versuchen und Messungen im Bereich der Stammbiegung und Faserstauchung. Masterarbeit an der BOKU, Wien.
- REITERER, A.; LICHTENEGGER, H.; TSCHEGG, S.; FRATZL, P., 1999: Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls. *Philosophical Magazine A* 79: 2173–2184.
- SALMEN, L.; BURGERT, I., 2009: Cell wall features with regard to mechanical performance. A review. COST Action E35 2004–2008: *Wood machining – micromechanics and fracture*. *Holzforschung* 63, 121–129.
- SINN, G., 2003: *Baumstatik. Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft*. Thalacker Medien, Braunschweig.
- SONDEREGGER, W.; NIEMZ, P., 2004: The influence of compression failure on the bending, impact bending and tensile strength of

- spruce wood and the evaluation of non-destructive methods for early detection. Holz als Roh- und Werkstoff 62, 335–342.
- SPATZ, H.-C.; PFISTERER, J. A., 2013: Mechanical Properties of Green Wood and Their Relevance for Tree Risk Assessment. Arboriculture & Urban Forestry 39, 218–225.
- TRENDELENBURG, R., 1940: Über Faserstauchungen in Holz und ihre Überwallung durch den Baum. Holz als Roh- und Werkstoff 3, 209–221.
- TERZIEV, N.; DANIEL, G.; MARKLUND, A., 2005: Dislocations in Norway spruce fibres and their effect on properties of pulp and paper. Holzforschung 59, 163–169.
- WEIHS, U., 2014: Problem Grünastbrüche. Teil 1: Phänomen, Bewertung. AFZ-DerWald, 34–37.
- WESSOLLY, L., 1989: Die natürliche Konstruktion Baum ist ein intelligentes statisch-dynamisches System. Neue Landschaft 1989, 340–352.
- WESSOLLY, L., 1991: Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. Holz als Roh- und Werkstoff 49, 99–104.
- WESSOLLY, L.; ERB, M., 2014: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle, Berlin: Patzer.
- WINANDY, J. E., 1994: Wood properties. Encyclopedia of Agricultural Science 4, 549–561.
- YLINEN, A., 1953: Über die mechanische Schaffformtheorie der Bäume. Holz als Roh- und Werkstoff 11, 209–210.

### Autoren

*Andreas Detter* ist Dipl.-Ing. der Landespflege und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger. Er ist Mitglied des Vorstands der Sachverständigen-Arbeitsgemeinschaft SAG Baumstatik e.V. und im Büro Brudi & Partner TreeConsult in Gauting bei München als Sachverständiger und Referent tätig.

*Prof. Dr. Steffen Rust* ist Professor für Baumpflege und Baumbiologie an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Göttingen.

*Dipl.-Forstingenieurin (FH) Catherina Rust* arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der HAWK im Forschungsprojekt „Zerstörungsfreie Analyse der Verkehrssicherheit von Bäumen in der Stadt“.

*Dipl.-Ing. Andreas Detter*  
ö.b.v. Sachverständiger  
Brudi & Partner  
TreeConsult  
Berengariastraße 7  
82131 Gauting  
Tel. (0 89) 75 21 50  
[a.detter@tree-consult.org](mailto:a.detter@tree-consult.org)



*Prof. Dr. Klaus Richter*  
Technische Universität München,  
Lehrstuhl für Holzwissenschaft  
Holzforschung München  
Winzererstr. 45  
80797 München  
Tel. (0 89) 21 80-64 21  
Fax (0 89) 21 80-64 29  
[richter@hfm.tum.de](mailto:richter@hfm.tum.de)

*Fakultät*  
Ressourcenmanagement HAWK  
Büsgenweg 1a  
37077 Göttingen  
Tel. (05 51) 50 32-1 73  
[rust@hawk-bhg.de](mailto:rust@hawk-bhg.de)