



Abschätzung der Belastbarkeit von Bäumen im Zugversuch. Biomechanische Grundlagen

ANDREAS DETTER, STEFFEN RUST

1 Einführung

Baumstatische Zugversuche werden als zerstörungsfreie Methode der eingehenden Untersuchung von Bäumen eingesetzt, um die Belastbarkeit der Wurzeln und des Stammes messtechnisch zu überprüfen und so die Stand- und Bruchsicherheit der Bäume abschätzen zu können. Das Messverfahren wurde bis heute weltweit an Tausenden von Bäumen angewandt (Wessolly 2010). Dabei ist eine etablierte Methode entstanden, deren Grundlagen jedoch nur durch wenige begutachtete Arbeiten beschrieben (z.B. Wessolly 1991) und erst in den letzten Jahren wissenschaftlich überprüft wurden (Kane & Clouston 2008, Sani et al. 2012, Detter & Rust 2013, Detter et al. 2014, Rust & Detter 2015, Detter et al. 2019).

Gleichzeitig können die Ergebnisse der zahlreichen Zugversuche aber auch dazu verwendet werden, Einschätzungen der Stand- und Bruchsicherheit, die anhand rein visueller Kriterien getroffen wurden, messtechnisch zu überprüfen. Ebenso können Erkenntnisse, die bei der wissenschaftlichen Aufarbeitung der methodischen Ansätze der Zugversuche gewonnen werden, auch die Qualität der visuellen Kontrolle durch ein besseres Verständnis der biomechanischen Hintergründe und der tatsächlichen Leistungsfähigkeit von Bäumen verbessern.

2 Baumstatische Zugversuche

2.1 Grundlagen

Grundsätzlich wird in der Baumstatik die Tragfähigkeit des Baumes den zu erwartenden Windlasten gegenüber gestellt, um die Sicherheit rechnerisch zu ermitteln.

Baumstatische Zugversuche erfolgen in mehreren Arbeitsschritten:

- Zugversuch: Messung der Baumreaktion auf definierte statische Belastungen
- Extrapolation: Hochrechnung der Tragfähigkeit hinsichtlich Bruch und Kippen durch Extrapolation auf definierte Grenzwerte
- Windlastanalyse: Abschätzung der am Standort zu erwartenden Windbelastung
- Bewertung: Vergleich von Tragfähigkeit und Windlast zur rechnerischen Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit

Der Zugversuch ist also nicht nur ein Messverfahren, das auf die mechanischen Eigenschaften des Baumes abzielt. Baumstatische Zugversuche beinhalten systematische Auswertungsschritte, um vom Ergebnis der zerstörungsfreien Messung am Baum zu einer Bewertung der Verkehrssicherheit zu kommen und stellen damit eine in sich geschlossene Untersuchungsmethode dar (Detter et al. 2010).

Das eigentliche Messergebnis des Zugversuchs zeichnet zunächst ein sehr exaktes Bild der Reaktion des Baumes auf eine Biegebelastung. Das Ziel der Untersuchung ist jedoch die Bestimmung der Sicherheit gegen Versagen. Wie bei allen anderen Untersuchungsverfahren kann dies nicht ohne weitere Bewertungsschritte erfolgen, die spezifische Analysen, vereinfachende Abschätzungen und Richtwerte enthalten. Damit unvermeidliche Unsicherheiten nicht zu einer falschen Einschätzung der Gefahr eines Versagens führen, werden die Bewertungen als Extremwertanalysen angelegt.

Grundsätzlich stellen die Messergebnisse jedoch bereits die Beziehungen zwischen den aufgebrachtten Kräften und der Tragfähigkeit des Baumes dar (Rust u. Weihs 2007). Die ermittelten Messwerte beziehen sich auf Reaktionen des Baumes, die im Ernstfall auch zum Versagen führen könnten: die Stauchung der Randfasern des Stammes und die Neigung der Wurzelplatte unter Last. Diese Parameter werden bei der Hochrechnung als Indikatoren für die Belastbarkeit der tragenden Teile eines Baumes verwendet.



Die so geschätzte Tragfähigkeit wird sodann mit den am Standort zu erwartenden Windlasten ins Verhältnis gesetzt. Daraus ergibt sich ein Sicherheitsfaktor, der ausdrückt, wie groß die Belastbarkeitsreserven des Baumes sind. Wenn die Widerstandskraft genau den zu erwartenden Windlasten entspricht, beträgt der Sicherheitsfaktor 1. In Anbetracht der Unwägbarkeiten, die jedem Schätzverfahren innewohnen, müssen bei einem statischen Nachweis aber über die einfache Sicherheit hinaus zusätzliche Tragfähigkeitsreserven vorhanden sein, die in der Regel mit dem Sicherheitsfaktor 1,5 veranschlagt werden.

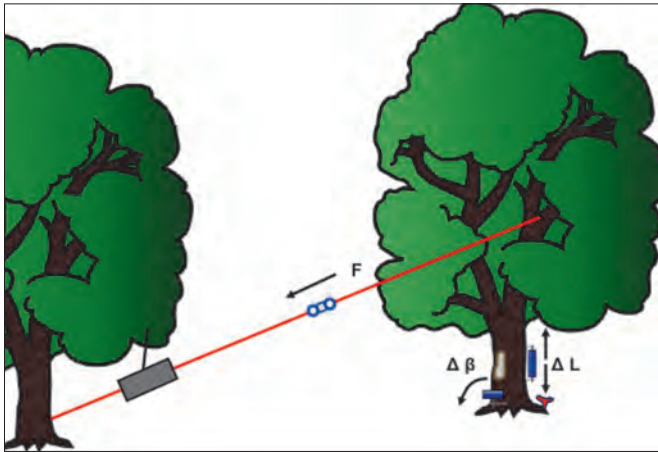
2.2 Zugversuch: Aufbau und Durchführung

Beim Zugversuch wirken über ein in der Krone befestigtes Seil Zugkräfte auf den Baum ein. Während der Baum einer zunehmenden Last ausgesetzt wird, reagieren Stamm und Wurzelplatte mit geringfügigen Verformungen, die für das menschliche Auge unsichtbar bleiben, jedoch durch hoch auflösende Messgeräte erfasst werden können. Hierzu werden ein elektronischer Kraftmesser (Dynamometer) und spezielle Dehnungs- bzw. Neigungssensoren (Elastometer und Inclinometer) eingesetzt.

Drei Messwerte werden kontinuierlich aufgezeichnet:

- die auf den Baum einwirkende Kraft (Auflösung 0,1 kN, also etwa 10 kg),
- die Dehnung bzw. Stauchung der Randfasern im Stamm (Auflösung 1/10 000 mm bei einer Genauigkeit von 1/1000 mm),
- die Neigung der Wurzelplatte (Auflösung 1/1 000°, Genauigkeit 1/500°).

Diese Messdaten können elektronisch gespeichert und an einem Computer überwacht werden. Jeder Zugversuch wird bei vergleichsweise geringen Reaktionen des Baumes beendet. Durch die konstante Überwachung kann sichergestellt werden, dass alle entstandenen Verformungen reversibel sind und der untersuchte Baum in seiner tragenden Struktur sowie an Rinde und Wurzeln nicht beschädigt wird.



■ Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Zugversuchs.

3 Bruchsicherheit des Stammes

3.1 Bruchverhalten von Holz

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 u. Jayne 1982, Niemz 1993, Winandy 1994, Natterer et al. 2000).

Dieses Ereignis wird als Primärversagen bezeichnet, da der Holzkörper irreversibel verformt wird und sich die Elastizität des Stammes ändert (Wessolly u. Erb 2014). Dies wird als eine Vorschädigung eingestuft (Wessolly 1989), weshalb der Punkt des Primärversagens als Kriterium für die Abschätzung der Bruchsicherheit bei der Zugversuchsmethode verwendet wird (Sinn 2003, Detter u. Rust 2013, Wessolly u. Erb 2014). Ob tatsächlich eine Schwächung des Materials durch das Primärversagen eintritt, und



ob dies aus biologischer Sicht für Bäume bedeutsam ist, wird in der Fachliteratur kontrovers diskutiert (Mergen 1954, Niklas u. Spatz 2012).

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 (Detter & Rust 2013). Daher spricht man von der Proportionalitätsgrenze der Verformung. In der Mechanik wird er als Überschreiten des Hookeschen Bereichs definiert, wobei der Stamm den elastischen Bereich der Biegung verlässt und im Material viskoelastische und später plastische Verformungen auftreten. 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).

3.2 Bruchversuche am stehenden Stamm

Bisher war es nicht ohne weiteres möglich, beim Bruch eines Baumes die Proportionalitätsgrenze zu bestimmen. Alle bisherigen Untersuchungen an stehenden Bäumen stellen lediglich auf die maximale Biegebelastbarkeit des Stammes ab. Ebenso wird bei Biegeversuchen zur Materialprüfung als Ergebnis in der Regel lediglich die maximal bis zum Bruch auftretende Biegespannung. Diese Spannungen eignen sich aber nicht für Sicherheitsüberlegungen, da bei solchen Belastungen die Elastizitätsgrenze der Fasern überschritten würde (Wessolly u. Erb 2014).

Mit Hilfe eines neuen Verfahrens (Detter et al. 2014) wurde in Bruchversuchen am stehenden Baum für verschiedenen Baumarten neben der maximalen Biegebelastbarkeit auch das Biegemoment bei Erreichen der Proportionalitätsgrenze bestimmt. Mit Hilfe von Standardmesstechnik für die Anwendung der Zugversuchsmethode (TreeQinetic, argus electronic GmbH, Rostock) wurde das einwirkende Biegemoment und die hervorgerufene Stammdurchbiegung konstant messtechnisch überwacht. Ähnlich wie in anderen Prüfverfahren wird das Erreichen der Proportionalitätsgrenze anhand der Abweichung vom linear-elastischen Verhalten des Stammes bestimmt (Farquhar u. Zhao 2006).

Dieses Vorgehen wurde durch Bruchversuche an ganzen Baumstämmen und defektfreien Kleinproben im Labor überprüft und bestätigt (Detter u. Rust 2013).

■ **Abb. 2: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Stauchungszone, Verlauf von oben links nach Mitte rechts; Tangentialschnitt. M. Risse, Holzforschung München.**

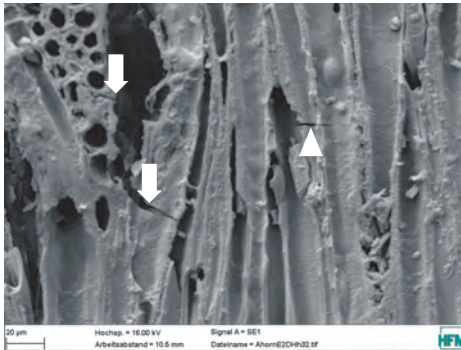


3.3 Faserstauchungen

Erreicht die Windeinwirkung zwar die Primärversagensgrenze, aber nicht die zum endgültigen Versagen erforderliche Last, können Bäume das entsprechende Sturmereignis überstehen, ohne abzubrechen. Dabei entstehen plastische Verformungen der Randfasern, die meist jedoch nur mikroskopisch erkennbar sind (vgl. Detter et al. 2015). Bei einer 100-fachen Vergrößerung ist im Längsschnitt ein Ausknicken der Fasern in tangentialer Richtung erkennbar.

Die Stauchungszone verläuft in einem Winkel von etwa 60 bis 70° zur Faserrichtung und erstreckt sich über Holzfasern, großlumige Gefäße sowie Holzstrahlgewebe (Abb. 2). In diesem Bereich knicken die Zellwandstrukturen der Holzfasern und Gefäße seitlich aus. In diesem Bereich knicken die Zellwandstrukturen der Holzfasern und Gefäße seitlich aus. Dies ist auch in der Forst-/Holznutzung ein wichtiges Thema, dort als Faserstauchung und Faserbruch bezeichnet (Richter 2010).

Mit Hilfe eines Elektronen-Rasterelektronenmikroskops sind zusätzlich folgende Versagensformen in der Holzstruktur erkennbar: Axiale und transversale Rissbildung in den Holz-



■ Abb. 3 (li.) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme. Rissbildung am Ende eines Holzstrahls (Blockpfeile) und durch eine Holzfaser (Spitzpfeil). Tangentialschnitt.



■ Abb. 4 (re.) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Auffalten der dünnen Wand eines Frühholzgefäßes in der Knickzone (Spitzpfeil) und Delamination der Holzstrahlwand (Blockpfeil). Tangentialschnitt. REM-Aufnahmen: M. Risse, Holzforschung München

strahlen und der S_2 -Schicht der Faserzellwände (Abb. 3), Auffalten der Gefäßwände (Abb. 4).

Diese irreversiblen Veränderungen der holzanatomischen Struktur entstehen, wenn die tragenden Elemente innerhalb des geschlossenen Holzkörpers beim Primärversagen seitlich weggleiten. Dabei bilden sich in den mehrreihigen Holzstrahlen durch Rissbildung an Zellenwänden große Zwischenräume, weil die Holzfasern im Bereich der Holzstrahlen infolge der seitlichen Verschiebung aufspreizen. Die Überwindung der Drucksteifigkeit der aus den Holzfasern gebildeten Gitterstruktur kann das seitliche Ausknicken einleiten (vgl. Gibson 2005). Da die Querkzugfestigkeit der Holzstrahlen vermutlich gering ist, wäre ihr Versagen ähnlich zu beurteilen wie das spiralförmige Auffalten und seitliche Einknicken der dünnen Wände großlumiger Früh-

holzgefäße. Diese tragen zwar wenig zur Festigkeit des Holzes bei, werden aber dennoch besonders stark verformt, wenn der Versagensprozess einsetzt.

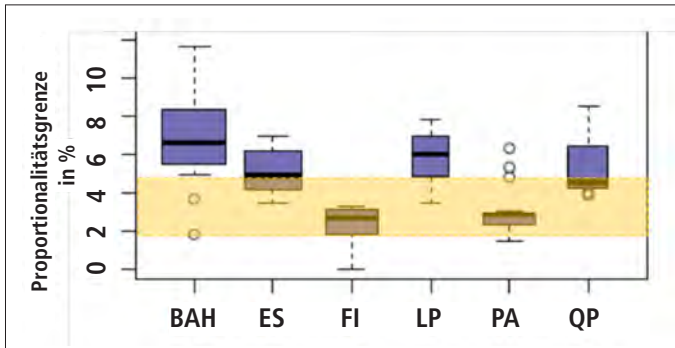
3.4 Hochrechnung der Bruchsicherheit aus Zugversuchen

Die Abschätzung der Bruchsicherheit erfolgt bei der Zugversuchsmethode maßgeblich durch die unter Last gemessene Verformung der Randfasern und die Proportionalitätsgrenze des grünen Holzes, die als Richtwert aus Materialkatalogen übernommen wird (Wessolly & Erb 2014). Wissenschaftliche Untersuchungen, bei denen die tatsächliche elastische Verformbarkeit der Randfasern an stehenden Bäumen messtechnisch erfasst wurde (vgl. Detter et al. 2014), haben gezeigt, dass die in der Zugversuchsmethode verwendete Steifigkeit der Randfasern ein guter Indikator für das Primärversagen von Stämmen ist. Die Richtwerte, die derzeit hierfür verwendet werden, liegen im Bereich von 1,6 bis 4,3 Promille. Sie stellen eine untere Abschätzung der tatsächlichen Materialeigenschaften dar. Auf diese Weise kann die Tragfähigkeit der Stämme zwar kaum über-, aber durchaus unterschätzt werden.

4 Erkenntnisse zur Standsicherheit

Die Verankerungskraft der Wurzeln wird anhand des typischen Neigungsverhaltens von Bäumen ermittelt (Sinn 1990, Wessolly 1994). Im Zugversuch werden maximal Neigungen von $0,25^\circ$ eingestellt. Bis zu diesem Punkt ist die Verformung voll reversibel, es werden keine dauerhaften Schäden am Wurzelsystem verursacht. Falls nach der Entspannung zunächst geringfügige Neigungen von wenigen Hundertstel Grad verbleiben, werden diese innerhalb einiger Minuten rückgestellt (James et al. 2013). Ursache ist vermutlich ein viskoelastisches Verhalten des Bodens. Wird der Zugversuch bereits bei einem geringeren Neigungsgrad abgebrochen, lässt sich die aufgebrachte Last zunächst auf den für $0,25^\circ$ erforderlichen Wert hochrechnen.

Oberhalb von $0,25^\circ$ Neigung streut das Kippverhalten jedoch offenbar sehr stark (vgl. Coutts 1983, Lundström et al. 2007). Deutliche Veränderungen im Kippverlauf werden vielfach bereits bei etwa $0,8$ bis 1° Neigung erkennbar. Für ähnliche Neigungsgrade berichten andere Untersuchungen auch von ersten Wurzelabrissgeräuschen



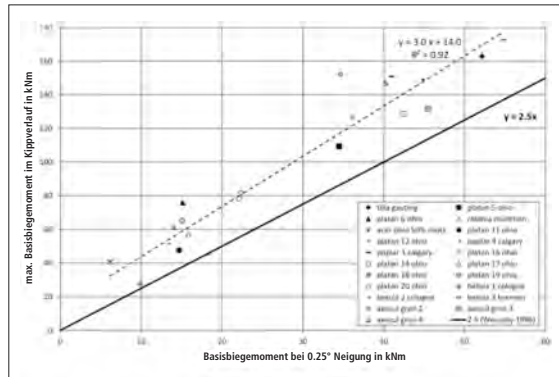
■ Abb. 5: Proportionalitätsgrenzen von 78 stehenden Bäumen der Arten *Acer pseudo-platanus*, *Fraxinus excelsior*, *Picea abies*, *Platanus acerifolia*, *Populus canadensis*. Der gelb unterlegte Bereich stellt die bei Wessolly & Erb 2014 angegebenen Werte dar.

(Coutts 1983), bleibenden Neigungen des Stammes (Sinn 1990) und einer Reduktion der Steifigkeit des Wurzelsystems (Jonsson 2006). Die Widerstandskraft der Verankerung ist dann aber noch nicht vollständig überwunden, die maximale Kipplast tritt erst bei höheren Neigungen auf, meist bei etwa 2 bis 7°.

4.1 Zuverlässigkeit der Hochrechnung

Die derzeit eingesetzten Verfahren zur Hochrechnung der Messergebnisse aus dem Zugversuch wurden durch Zugversuche an Bäumen, bei denen die Gehölze bis zum Versagen belastet werden, auf wissenschaftlicher Basis überprüft. Für die Untersuchungen wurden Zugversuchsinstrumente des Typs TreeQinetic (argus electronic GmbH, Rostock) eingesetzt. Die Hochrechnung der Kipplast basiert auf einem engen Zusammenhang zwischen dem Biegemoment, das zum Erreichen einer geringen Neigung am Stammfuß erforderlich ist, und der maximalen Belastung beim Kippversagen des Baumes. Eine solche Korrelation wurde nicht nur von Wessolly (1996) beschrieben, sondern auch bei Smiley (2008) für Jungbäume festgestellt.

In Abbildung 6 wurden die Daten für etwa 20 Einzelbäume zusammengefasst, die teils erhebliche Schäden am Wurzelsystem aufwiesen. Sie stockten an Straßen, in Parks



■ Abb. 6: Hochrechnung der Kipplast aus dem 0,25°-Moment.

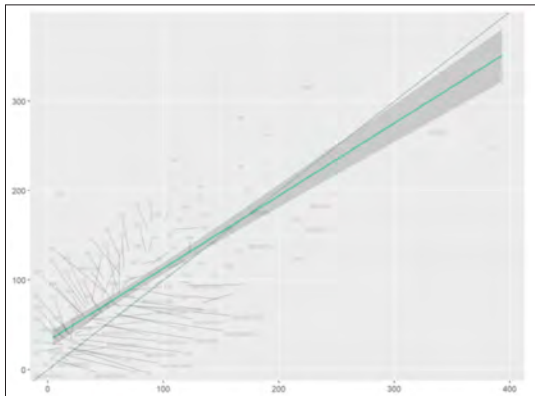
oder in städtischen Baumpflanzungen und wurden im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit umgezogen. Die gute Korrelation ($R^2=0,92$) weist darauf hin, dass die Belastung bei 0,25° Neigung als Indikator für die Kipplast dieser Bäume geeignet ist.

Auch nach Abschluss weiterer Untersuchungen an über 150 Bäumen zeigt sich die grundsätzliche Eignung des Verfahrens. Gegenüber anderen Verfahren ergibt sich bei dieser Vorgehensweise eine deutlich bessere Näherung der tatsächlichen maximalen Widerstandskraft des Baumes gegen Entwurzeln (Rust & Detter 2019). Zwar wird die tatsächliche Widerstandskraft meist unterschätzt, als sichere Hochrechnung, bei der unsichere Bäume mit großer Gewissheit erfasst werden, ist dieser Ansatz jedoch gut geeignet (vgl. Detter et al. 2019).

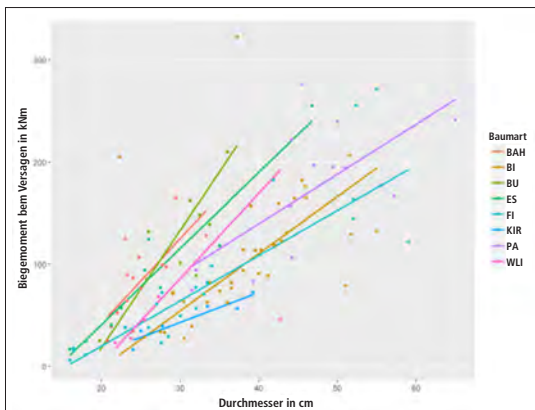
Die Verankerung wird von verschiedenen Baumarten unterschiedlich stabil ausgebildet (vgl. Abb. 8). Demnach sind Berg-Ahorne, Rot-Buchen und Eschen tendenziell kräftiger verankert, während die Wurzelsysteme von Rot-Fichte, Birke und Vogel-Kirsche bei gleichem Durchmesser weniger belastbar sind.

4.2 Zusammenfassung Kippen

Der Kippvorgang bei verschiedenen Bäumen zeigt vielfach große Ähnlichkeit. Daher lässt sich die Verankerungskraft durch geeignete Messverfahren ausreichend zuverlässig abschätzen, um Sicherheitsaussagen treffen zu können. Einflussfaktoren wie



■ Abb. 7: Aus Zugversuchen geschätzte Belastbarkeit des Wurzelsystems nach Wessolly & Erb (2014) und gemessene tatsächliche Widerstandskraft der Verankerung.



■ Abb. 8: gemessene Belastbarkeit der Verankerung verschiedener Baumarten nach Stammdurchmesser in 1 m Höhe. Ergebnisse von Belastungstests bis zum Entwurzeln.

Bodenart, Wurzelentwicklung, Bodenfeuchte und Temperatur sollten noch eingehender wissenschaftlich untersucht werden, um die Zuverlässigkeit solcher Verfahren zu verbessern. Die Frage nach der Standsicherheit von Bäumen nach maßgeblichen Eingriffen in den Wurzelbereich oder bei ausgeprägten Schadsymptomen lässt sich aber in aller Regel nur durch baumstatische Zugversuche rasch und zuverlässig klären. Hier liegt ein wichtiges Einsatzgebiet für diese Methode.

Literatur

- Bodig, J., Jayne, B.A., 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Detter, A. & Rust, S. (2013). Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.) *Jahrbuch der Baumpflege* 2013, Haymarket Media.
- Detter, A., & Rust, S. (2018). Grundlagen und Kriterien zur visuellen Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen. In *Jahrbuch der Baumpflege* 2018 (S. 145–160). Haymarket Media GmbH & Co. KG.
- Detter, A., Brudi, E. und Bischoff, F. (2010). Messverfahren und Bewertungsmethoden zur Verkehrssicherheit. *AFZ-DerWald* (8), 34–35.
- Detter, A., Richter, K., Rust, C., & Rust, S. (2015). Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz. In *Jahrbuch der Baumpflege* 2015 (S. 156–167).
- Detter, A., Rust, S., Rust, C., & Maybaum, G. (2014). Determining strength limits for standing tree stems from bending tests. In 18th international nondestructive testing and evaluation of wood symposium. Madison, USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Detter, A., Wassenaer, P. van, & Rust, S. (2019). Stability recovery in London Plane trees 8 years after primary anchorage failure. *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(6), 279–288.
- Gibson Lorna J., 2005. Biomechanics of cellular solids. *Journal of Biomechanics* 38, 377–399.
- 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.
- Mergen, Francois, 1954. Mechanical aspects of wind-breakage and windfirmness. *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.
- Niemz, P., 1993. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Holz. DRW-Verl, Leinfelden-Echterdingen.
- Niklas, K.J., Spatz, H.-C., 2012. *Plant Physics*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Richter, C. (2010): *Holzmerkmale*. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden (S. 169–172).
- Rust, S., & Weihs, U. (2007). Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung (S. 215–241).
- Rust, S., & Detter, A. (2019). Experimental test of non-destructive methods to assess the anchorage of urban trees. *Proceedings of the 21st non-destructive testing and evaluation of wood symposium 2019*. 21st non-destructive testing and evaluation of wood symposium, Freiburg i. Br.
- Sani, L., Lisci, R., Moschi, M., Sarri, D., Rimediotti, M., Vieri, M., & Tofanelli, S. (2012). Preliminary experiments and verification of controlled pulling tests for tree stability assessments in Mediterranean urban areas. *Biosystems Engineering*, 112(3), 218–226.
- Sinn, G. (1990). *Untersuchungen zur Kippursache von Eichen im Riederwald Frankfurt*, M. SVK-Verl.
- Smiley, E.T. (2008): *Root Pruning and Stability of Young Willow Oak*. *Arboriculture & Urban Forestry* 34 (2): 123–128.
- Wessolly, L. (1989). Die natürliche Konstruktion Baum ist ein intelligentes statisch-dynamisches System. *Neue Landschaft*, 1989(34), 340–352.
- Wessolly, L., 1991. Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 49, 99–104.
- Wessolly, L. (1994). Wurzelschäden und Standsicherheit von Bäumen. *Neue Landschaft* 39 (11), 853–860. Wessolly, L. (2010). 25 Jahre Baumstatik – eine Bilanz. *Pro Baum* 3, 12–15.
- Wessolly, L. & Erb, M. (2014): *Handbuch der Baumstatik + Baumkontrolle*, Berlin: Patzer
- Winandy, J.E., 1994. Wood properties. *Encyclopedia of Agricultural Science* 4, 549–561.