

# Zugversuche

**Prof. Dr. Steffen Rust, Göttingen und Dipl.-Ing. Andreas Detter, Gauting**

Zugversuche werden seit vielen Jahren in der Sachverständigentätigkeit als zerstörungsfreie Verfahren eingesetzt, um Bäume mit erhöhter Versagensgefahr identifizieren und gleichzeitig ausreichend sichere Exemplare belassen zu können. Gerade Altbäume verfügen vielfach über hohe Sicherheitsreserven, obwohl sie maßgebliche Defektsymptome am Holzkörper aufweisen. Bereits Ende der 1980er Jahre wurden aus diesem Grund in einem Forschungsprojekt an der Universität Stuttgart baumstatische Zugversuche entwickelt (Sinn & Wessolly 1989) und bis heute an weltweit über 8.000 Bäumen angewandt (Wessolly 2010). Basierend auf der wertvollen Vorarbeit, die in den letzten 25 Jahren hauptsächlich von Praktikern geleistet wurde, ist ein etabliertes Messverfahren entstanden. Wissenschaftlich wurde es bislang jedoch nur durch wenige Arbeiten überprüft und kaum durch Publikationen belegt. In einem aktuellen Forschungsprojekt, das an der HAWK Göttingen durchgeführt wird, soll begonnen werden, diese Lücke zu schließen. Der heutige Stand der Zugversuchsmethode wird im Folgenden dargestellt.

## 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, ggf. können wichtige Parameter durch dynamische Messungen im natürlichen Wind oder durch Ausschwingversuche ermittelt werden
- Bewertung:** Vergleich von Tragfähigkeit und Windlast zur rechnerischen Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit

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 Verkehrssicherheit führen, werden die Bewertungen immer als Extremwertanalysen angelegt.

Grundsätzlich werden die Messergebnisse des Zugversuchs als Indikatoren für die Belastbarkeit der tragenden Teile eines Baumes verwendet. Die so geschätzte Tragfähigkeit

wird den am Standort zu erwartenden Windlasten gegenübergestellt. Deren Verhältnis lässt sich nun in Form von Sicherheitsfaktoren ausdrücken. Wenn die Widerstandskraft genau den zu erwartenden Windlasten entspricht, beträgt der Sicherheitsfaktor 1. In Anbetracht der Unwägbarkeiten, die jedem Schätzverfahren innewohnen, wird in der Baumstatik üblicherweise ein Sicherheitsfaktor von 1,5 gefordert.

## 2 Zugversuch: Aufbau und Durchführung

Beim Zugversuch werden über ein in der Krone befestigtes Seil Belastungen auf den Baum ausgeübt. 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. Drei Messwerte werden kontinuierlich aufgezeichnet:

- die auf den Baum einwirkende Kraft,
- die Dehnung oder Stauchung der Randfasern im Stamm und
- die Neigung der Wurzelplatte.

Diese Messdaten können elektronisch gespeichert und an einem Computer überwacht werden. Hierzu werden ein elektronischer Kraftmesser (Dynamometer) und hochauflösende Dehnungs- bzw. Neigungssensoren (Elastometer und Inclinometer) eingesetzt. 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.

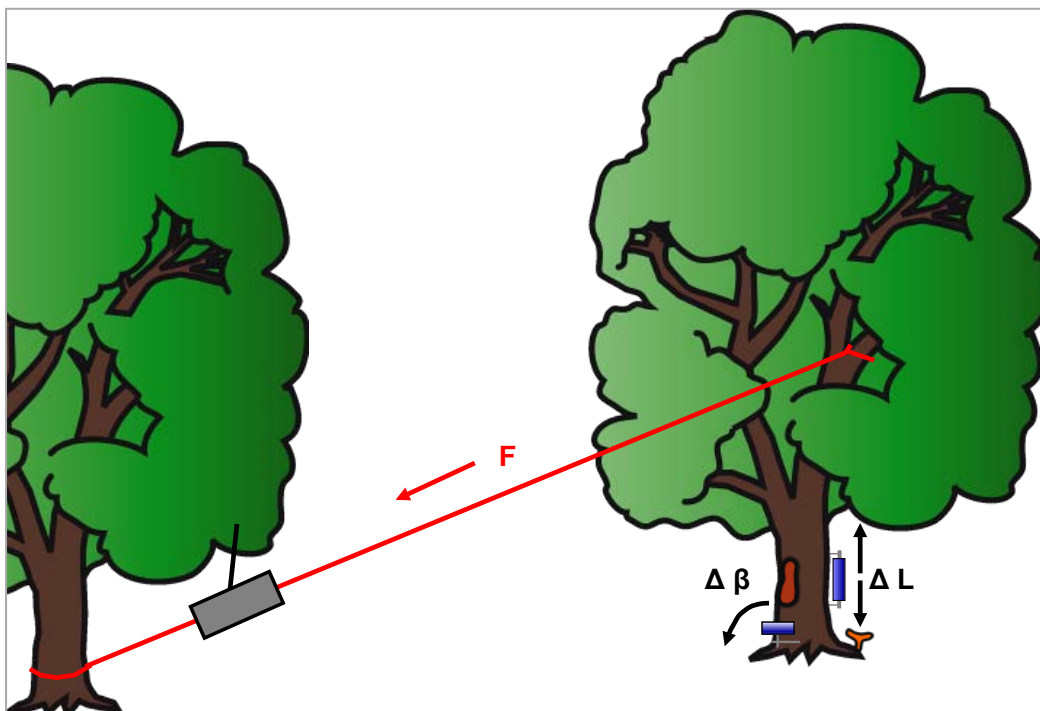


Abb. 1 Aufbau Zugversuch (schematisch)

### 3 Windlastanalyse: Grundlagen und Parameter

Alle Verfahren zur Windlastermittlung zielen darauf ab, die am Standort während eines definierten Bemessungswindereignisses zu erwartenden Belastungen abzuschätzen. Ein ausreichend sicherer Baum muss den Lasten widerstehen, die durch Wind, Regen, Schnee und Eis auf seine Krone einwirken. Der Wind spielt aufgrund der vorwiegenden Belastungsrichtung quer zum Stamm hier eine dominante Rolle.

Die für einen Baum anzusetzende Windbelastung wird im Wesentlichen bestimmt durch:

- die Geschwindigkeit und Struktur des Windes am Baumstandort
- den Widerstand des Baumes im Luftstrom, d.h. die Größe der statischen Lasteinzugsfläche (des "Kronensegels") und die dynamische Baumreaktion (aufgrund seiner Eigenschaften als nachgiebige, durchlässige, schwingungswillige Struktur)

Zusammenfassend lassen sich 4 wichtige Parameter der Windlastabschätzung nennen, die auch bei einer visuellen Kontrolle berücksichtigt werden sollten: die Exposition und Höhe des Baumes sowie die Windeinzugsfläche und die Schwingungswilligkeit des Baumes. Die Oberfläche, die dem Wind ausgesetzt ist, wird durch die vertikale Projektion aller oberirdischen Teile des Baumes (belaubte Krone und Stamm) in der gewählten Lastrichtung bestimmt. Die Windgeschwindigkeit wird durch die Geländeoberfläche erheblich beeinflusst. Daher muss für den Standort des Baumes abgeschätzt werden, wie stark er dem Wind bei einem Sturmereignis ausgesetzt wäre. Anpassungen der Kronen, wie z.B. das Verringern der Lasteinzugsfläche im Wind oder ein stromlinienförmiges Ausrichten von Blättern und Zweigen, werden durch artspezifische  $c_w$ -Werte für Baumkronen nach den Vorschlägen von WESSOLLY & ERB (1998) berücksichtigt. Dynamische Effekte, die durch das Schwingungsverhalten des Baums im böigen Wind entstehen, wurden in aktuellen Forschungsarbeiten zur dynamischen Reaktion von Bäumen in natürlichem Wind beschrieben (z.B. JAMES 2010) und sollten in die Abschätzung einfließen.

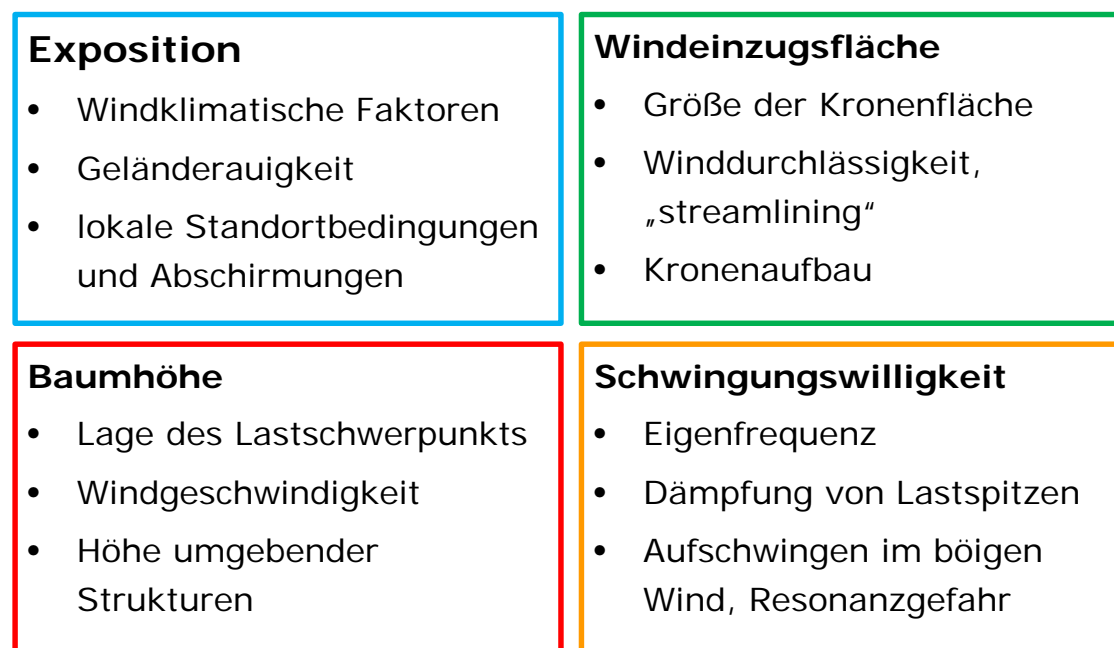


Abb. 2 Parameter der Windlastabschätzung.

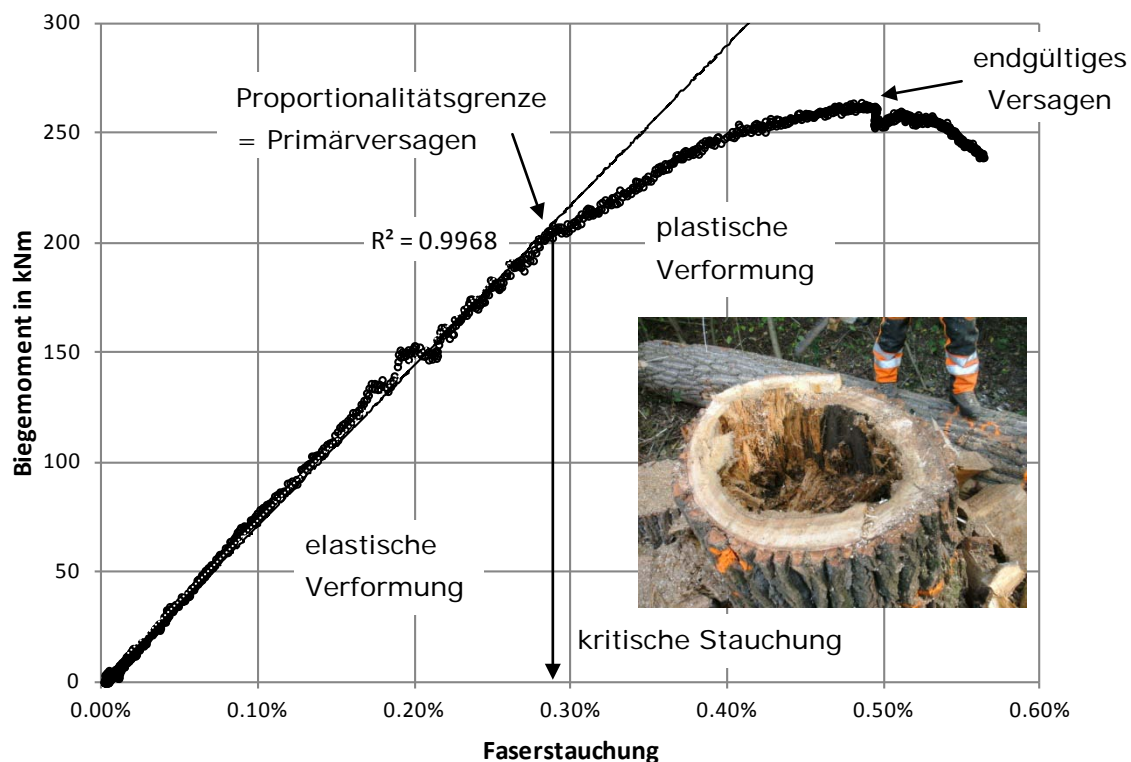
## 4 Extrapolation: Hochrechnung der Tragfähigkeit

Messdaten, die im zerstörungsfreien Zugversuch gewonnen wurden, müssen auf Grenzwerte hochgerechnet werden. Dadurch lassen sich kritische Lasten bestimmen, ab denen mit dem Beginn des Versagens zu rechnen ist. Diese werden dann mit der zu erwartenden Windlast am Standort verglichen. Die Extrapolation erfolgt in der Regel mit Hilfe von Spezialsoftware (z.B. *Arbostat*) und wird nachfolgend im Grundsatz erläutert.

### 4.1 Biegebelastbarkeit des Stammes

Für die Bewertung der Widerstandskraft gegen Stammbruch unter Biegung wird als Bezugswert die Proportionalitätsgrenze genutzt. Bis zu diesem Punkt ist die Verformung der Holzfasern voll elastisch, so dass das Holz nicht geschädigt wird und nach Ende der Belastung in seinen Ursprungszustand zurückgeht. Oberhalb dieses Grenzwertes tritt das Primärversagen ein, durch das Holzfasern irreversibel geschädigt werden. Bis schließlich der endgültige Bruch eines grünen Astes oder Stammes auftritt, muss die Belastung, anders als bei Bauholz, in der Regel aber noch weiter erhöht werden.

Im nachfolgenden Beispiel wurde eine Pappel mit rund 70 cm Stammdurchmesser, deren Stamm eine ausgedehnte zentrale Fäule aufwies, bis zum Bruch gezogen (Messdaten von R. Prosenz, Wien). Das Verhalten der überwachten Randfasern des Stammes ändert sich ab einer Verkürzung um rund 0,3%. Während sie bis zu diesem Punkt linear, d.h. proportional zur Belastung gestaucht wurden, nimmt ihre Verformung nun deutlich rascher zu. Daher wird dieser Wert als Proportionalitätsgrenze bezeichnet. Um die Belastbarkeit eines Stammes abzuschätzen, werden die im Zugversuch gemessenen Faserverformungen bis zum Richtwert für die Proportionalitätsgrenze extrapoliert.



**Abb. 3** Last-Verformungsdiagramm einer hohlen Pappel (Daten/Foto R. Prosenz)

## 4.2 Verankerungskraft des Wurzelsystems

Die Verankerungskraft der Wurzeln wird anhand des typischen Neigungsverhaltens von Bäumen extrapoliert. In einem ersten Schritt werden die gemessenen Neigungen nach einer exponentiellen Funktion auf einen Wert von  $0,25^\circ$  hochgerechnet. Bis zu diesem Punkt ist die Neigung voll reversibel, es werden keine dauerhaften Schäden am Wurzelsystem verursacht. Oberhalb von  $0,25^\circ$  Neigung streut das Kippverhalten sehr stark. Daher stellt der zweite Schritt der Auswertung nicht mehr auf den weiteren Verlauf der Neigungswinkel ab. Stattdessen wird die Kipplast abgeschätzt, indem die Last bei einer Neigung von  $0,25^\circ$  unabhängig von Baumart und Boden mit einem Faktor von 2,5 hochgerechnet wird (Wessolly 1996).

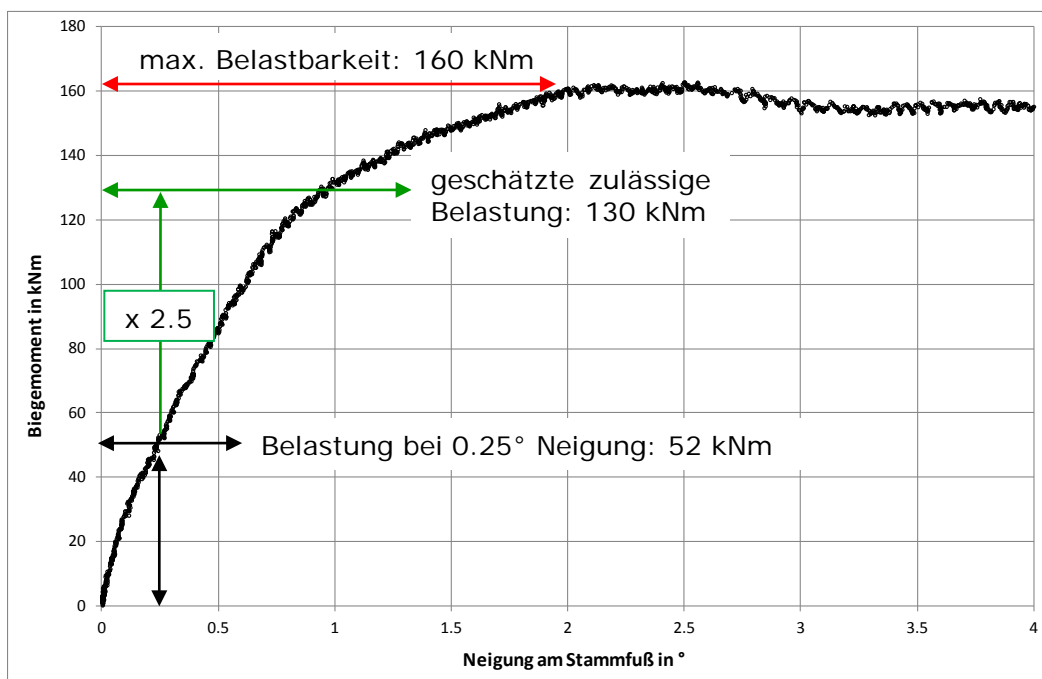


Abb. 4 Kippverlauf für eine Linde mit Brandkrustenpilzbefall (Auszug)

## 5 Aktuelle Untersuchungsergebnisse

### 5.1 Vergleich von Zugversuchen, Materialtests an Kleinproben und Literaturwerten

Zwei Eichen wurden Zugversuchen unterzogen. Anschließend wurden aus sechs Stammscheiben dieser Bäume 440 Prüfkörper entnommen, deren holzphysikalische Eigenschaften gemessen, auf den Stammquerschnitt hochgerechnet und mit denen der Zugversuche und mit Literaturwerten verglichen. Die Ergebnisse hatten die gleiche Größenordnung wie früher veröffentlichte, wichen jedoch vom „Stuttgarter Festigkeitskatalog“ ab. Beide gemessenen E-Module lagen deutlich über dem Literaturwert. Die Beziehungen zwischen den Materialeigenschaften der Prüfkörper unterschieden sich signifikant zwischen den Bäumen und den Messebenen innerhalb der Bäume. Die Untersuchung zeigt, dass weitere systematische und gut dokumentierte Messungen erforderlich sind, um die wissenschaftliche Basis der Zugversuche zu stärken (Bork et al. 2012).

## 5.2 Verändern Kronensicherungen das Schwingungsverhalten von Bäumen?

Bruchsicherungen werden verbaut, um die Verkehrssicherheit von Bäumen zu erhöhen. Da ein erheblicher Teil der vom Wind in den Baum eingeleiteten Energie allerdings bereits in der Krone dissipiert wird (Sellier und Fourcaud, 2009; Sellier, Fourcaud und Lac, 2006; Spatz, 2007) könnte es allerdings sein, dass Kronensicherungen so in die Dynamik des Baumes eingreifen, dass dadurch die Stand- oder Bruchsicherheit gefährdet werden. Es wird in der Praxis oft vermutet, dass die Dämpfung der Krone durch eine Kronensicherung vermindert und damit die Lasten an der Stammbasis erhöht würden (Pfisterer u. Spatz 2010). Auch wird angenommen, dass Kronensicherungen die Schwingungen »unterdrücken« würden (Mattheck, 2002). In dieser Untersuchung werden daher die Auswirkungen von statischen und dynamischen Bruchsicherungen auf die Eigenfrequenz und Dämpfung von Stadtbäumen untersucht.

Eigenfrequenz und Dämpfungsgrad von sieben Bäumen ohne, mit statischer und mit dynamischer Kronensicherung wurden im belaubten Zustand untersucht.

Der Einbau von Kronensicherungen hatte keinen messbaren Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Bäume. Andere Parameter dagegen schon. Diese Zusammenhänge können z.B. bei der Windlastanalyse für die Auswertung von Zugversuchen genutzt werden. Einen direkten Einfluss auf die Stabilität der Bäume haben die sinkenden Eigenfrequenzen mit steigendem Schlankheitsgrad wohl kaum, da es bisher keine Hinweise auf Resonanzversagen bei Bäumen gibt (Baker, 1997).

## 5.3 Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche

In zwei Experimenten wurden die Verankerung und Steifigkeit von Bäumen vor und nach einer Bewässerung sowie mehrfach über einen Winter mit starkem Frost hinweg gemessen. Die Stärke der Verankerung sank, auch oberhalb von 0 °C, mit steigender Bodentemperatur und nach der Bewässerung. Die Steifigkeit der Bäume stieg bei Temperaturen unter 0 °C stark an.

Sowohl eine Erhöhung des Bodenwassergehaltes als auch eine längere Frostperiode haben also wichtige Eingangsparameter der Zugversuche signifikant verändert. Im Fall der Bewässerung wurde die Standsicherheit rechnerisch vermindert, durch den Frost dagegen wurden die Bruch- und die Standsicherheit rechnerisch erhöht. Die Veränderungen lagen in der gleichen Richtung und Größenordnung der wenigen anderen Versuche dieser Art (Kamimura u. a., 2011; Peltola u. a., 2000; Silins u. a., 2000, Wohn 2003).

Oberhalb des Gefrierpunktes war kein Einfluss der Temperatur auf die rechnerisch ermittelte Bruchsicherheit feststellbar. Dies deckt sich mit dem Ergebnis von anderen Reihenuntersuchungen.

Ein Einfluss der Bodentemperatur auf die Verankerung bereits oberhalb von 0 °C, d. h. nicht erst unterhalb des Gefrierpunktes, wurde unseres Wissens bisher nicht dokumentiert, passt aber zu experimentellen und theoretischen Untersuchungen an Böden, die

eine Abnahme der Scherfestigkeit mit zunehmender Temperatur belegen (Jefferson, 1994).

Die Beobachtungen stehen im Widerspruch zu Ergebnissen von wiederholten Zugversuchen an Stadtbäumen, bei denen bei einem Anstieg der Bodentemperatur von 0°C auf 20°C eine geringfügig höhere Verankerungskraft gemessen wurde. Da in beiden Untersuchungen mögliche Veränderungen der Bodenfeuchte zwischen den Messungen nicht erfasst wurden, sind weitere Experimente erforderlich, um Ausmaß und Richtung des Zusammenwirkens von Bodentemperatur und –feuchte auf die Standsicherheit zu beurteilen.

Da die Effekte in Bezug auf den Frosteinfluss gesichert und durchaus nennenswert sind, sollten Zugversuche in einer lang anhaltenden Frostperiode nach Möglichkeit vermieden werden. Ansonsten sollte der Einfluss von Feuchte und Temperatur durch angemessene Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden.

#### **5.4 Zum Zusammenhang zwischen Schlankheitsgrad und Bruchversagen**

Der Schlankheitsgrad ist in der Forstwirtschaft traditionell ein wichtiger Indikator für die Stabilität von Wäldern. Empirisch belegt ist, dass schlanke, junge Nadelwälder in der Nassschneezone anfälliger für Schnee- und Eisbruch sind. Die Ergebnisse zur Windwurf- und Windbruchgefährdung sind jedoch widersprüchlich. Während Modellrechnungen zufolge schlanke Fichten eher brechen als gedrungene (Petty und Swain, 1985), zeigen Feldstudien, dass schlanke ähnlich oder sogar weniger anfällig sind (Müller, 2002; Schütz u. a., 2006; Albrecht u. a., 2010; Valinger und Fridman, 1997; Nishimura, 2005). Vor einigen Jahren wurde vorgeschlagen, einen Schlankheitsgrad von 50 als ein Versagenskriterium für defektfreie solitäre Bäume einzuführen (Mattheck u. a., 2001).

Ziel dieser Untersuchung ist der experimentelle Vergleich der Stabilität unterschiedlich schlanker Fichten durch quasi-statische Zugversuche bis zum Versagen.

Von entscheidender Bedeutung für die Bruchfestigkeit der Bäume war ihr Querschnitt, nicht ihre Form. Das Flächenträgheitsmoment in 1m Höhe bestimmte zum größten Teil das maximale Biegemoment beim Bruch. Die verbleibende Streuung wurde zu einem geringen Teil vom Schlankheitsgrad beeinflusst.

Bäume sind keine Balken mit immer und überall gleichen Materialeigenschaften. Die Festigkeit des Holzes wird von Faktoren wie Dichte, Winkel der Mikrofibrillen, Anteil des juvenilen Holzes, Faserlängen, Anteil des Druckholzes und Vorkommen von Ästen bestimmt. Alle diese Holzeigenschaften können von den Bäumen zur Anpassung an ihre individuelle Lastsituation variiert werden. So hatten die schlankeren Bäume dichteres Holz mit höheren Schallgeschwindigkeiten in den Randfasern. Dichteres Holz hat meist eine höhere Bruchfestigkeit (z.B. Steffenrem, Arne u.a., 2007; Rosner u.a., 2007).

Die Aussagen in der maßgeblichen und oft zitierten Arbeit von Petty und Swain (1985) wurden unter zwei offensichtlich unrealistischen Annahmen erzielt: Die Holzeigenschaften schlanker und gedrungener Bäume seien identisch, und ihre Kronen seien gleich groß. Geht man jedoch davon aus, dass die Kronen schlanker Bäume deutlich kleiner sind als

bei gedrungeneren, so zeigen auch die Berechnungen von Petty und Swain (1985), dass beide bei etwa gleicher kritischer Windgeschwindigkeit brechen. Hinzu kommt noch das vermutlich festere Holz der schlanken Bäume. Es verwundert daher nicht, dass unsere experimentellen Beobachtungen zum gleichen Ergebnis kommen wie die zahlreichen eingangs zitierten Feldstudien, nämlich dass schlanke Bäume nicht leichter versagen als gedrungene.

Mattheck u.a. (2001) haben die Vorstellung versagensgefährdeter schlanker Bäume aus dem Wald auf Stadtbäume übertragen. Unsere Ergebnisse zeigen aber, dass in dem für die Baumkontrolle wesentlichen Bereich des Schlankheitsgrades schlanke Waldbäume ebenso belastbar sind wie gleich dicke, gedrungene. Zwar kann der Schlankheitsgrad die Eigenfrequenz und Dämpfung von Bäumen beeinflussen (Rust et al. 2013 - Maurer/Braun), für Stadtbäume spielen im Gegensatz zu Waldbäumen die potentiell lasterhöhenden Resonanzeffekte aufgrund der Kronenarchitektur jedoch kaum eine Rolle (Spatz et al. 2007, James et al. 2006). Der Schlankheitsgrad 50 ist daher ungeeignet zur Unterscheidung zwischen gefährlichen und ungefährlichen Stadtbäumen.

## **6 Ausblick**

Bislang ist nur eine äußerst geringe Anzahl von Fehleinschätzungen durch Zugversuche, die zu einem unvorhergesehenen Versagen geführt haben, bekannt geworden. Dies bestätigt die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen, wonach die verwendeten Auswerteverfahren und Grenzwerte grundsätzlich sachlich richtig sind und die Sicherheitsfaktoren nicht zu hoch schätzen. Unter diesem Aspekt verdienen bei der weiteren Forschung mögliche Einschränkungen und Grenzen der Methode ebenso besondere Beachtung wie bislang unberücksichtigte Einflussfaktoren oder Parameter, die spezifische Anpassungen der Grenzwerte und Hochrechnungsfaktoren erlauben könnten. Hierzu sind in Kürze weitere Veröffentlichungen geplant.



## 7 Literatur

- Albrecht, A., M. Hanewinkel, J. Bauhus und U. Kohnle (2010). »How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations«. In: European Journal of Forest Research 131.1, S. 229–247.
- James, K., Haritos, N. und Ades, P. A. (2006). »Mechanical stability of trees under dynamic loads«. American Journal of Botany 93 (10): 1522–1530.
- Baker, C. (1997). »Measurements of the natural frequencies of trees«. In: Journal of Experimental Botany 48.5, S. 1125.
- Bork, R.; Düsterdiek, S.; Detter, A. & Rust, S. (2012), Vergleich von Zugversuchen und Materialtests an Kleinproben. In: D. Dujesiefken, (Hrg.), 'Jahrbuch der Baumpflege'
- JAMES, K. (2010): A dynamic structural analysis of trees subject to wind loading. PhD Thesis, Univ. Melbourne
- Jefferson, I. (1994). »Temperature effects on clay soils«. Diss. Loughborough University of Technology.
- Jonsson, M. J., A. Foetzki, M. Kalberer, T. Lundström, W. Ammann und V. Stöckli (2006). »Root-soil rotation stiffness of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growing on subalpine forested slopes«. In: Plant and Soil 285.1-2, S. 267–277.
- Kamimura, K., K. Kitagawa, S. Saito und H. Mizunaga (2011). »Root anchorage of hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments«. In: European Journal of Forest Research 131.1, S. 219–227.
- Mattheck, C. (2002). »A new failure criterion for non decayed solitary trees«. In: Arboricultural Journal 26, S. 43–54.
- Mattheck, C., K. Bethge, I. Tesari und R. Kappel (2001). »Ein neues Versagenskriterium für nicht fäulegeschädigte solitary Bäume.« In: Wissenschaftliche Berichte FZKA 6666.
- Müller, F. (2002). »Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäulerisiko in Fichtenbeständen auf Einzelbaumebene«. Diss. TU München.
- Neild, S. A. und C. J. Wood (1999). »Estimating stem and root-anchorage flexibility in trees«. In: Tree physiology 19.3, S. 141.
- Nishimura, T. B. (2005). »Tree characteristics related to stem breakage of *Picea glehnii* and *Abies sachalinensis*«. In: Forest Ecology and Management 215.1-3, S. 295–306.
- Peltola, H., S. Kellomäki, A. Hassinen und M. Granander (2000). »Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland«. In: Forest Ecology and Management 135.1-3, S. 143–153.
- Petty, J. a. und C. Swain (1985). »Factors Influencing Stem Breakage of Conifers in High Winds«. In: Forestry 58.1, S. 75–84.
- Pfisterer, J. und H.-Ch. Spatz (2010). »Wechselbeziehungen zwischen Windlast und Schwingungsverhalten von Baumkronen«. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.)(2010). »Jahrbuch der Baumpflege 2010«, Haymarket Media
- Rosner, S., A. Klein, U. Müller und B. Karlsson (2007). »Hydraulic and mechanical properties of young Norway spruce clones related to growth and wood structure«. In: Tree Physiol 27.8, S. 1165–1178.
- Rust, S., G. Braun, L. Maurer, A. Detter (2013). »Verändern Kronensicherungen das Schwingungsverhalten von Bäumen?«. Jahrbuch der Baumpflege
- Schütz, J.-P., M. Götz, W. Schmid und D. Mandallaz (2006). »Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture«. In: European Journal of Forest Research 125.3, S. 291–302.
- Sellier, D. und T. Fourcaud (2009). »Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds«. In: American Journal of Botany 96.5, S. 885.
- Sellier, D., T. Fourcaud und P. Lac (2006). »A finite element model for investigating effects of aerial architecture on tree oscillations.« In: Tree physiology 26.6, S. 799–806.
- Silins, U., V. J. Lieffers und L. Bach (2000). »The effect of temperature on mechanical properties of standing lodgepole pine trees«. In: Trees 14.8, S. 424–428.
- SINN, G., UND L. WESSOLLY. 1989. »Baumstatik - zwei neue zerstörungsfreie Messverfahren. Teil 1: Ermittlung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen durch Messung«. Das Gartenamt 38 (7): 422–428.
- Spatz, H. (2007). »Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations?«. In: American Journal of Botany 94.10, S. 1603–1611.

- Spatz, H., F. Brüchert, J. A. Pfisterer (2007). »Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations?« In: American Journal of Botany 94.10, S. 1603–1611.
- Steffenrem, Arne, Saranpää, Pekka, Lundqvist, Sven-Olof und Skrøppa, Tore (2007). »Variation in wood properties among five full-sib families of Norway spruce (Picea abies)«. In: Ann. For. Sci. 64.8, S. 799–806.
- Valinger, E. und J. Fridman (1997). »Modelling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics«. In: Forest Ecology and Management 97, S. 215–222.
- WESSOLLY, L. & ERB, M. (1998): Handbuch der Baumstatik + Baumkontrolle, Berlin: Patzer
- WESSOLLY, L. (1996) Standsicherheit von Bäumen. Stadt und Grün 4: 268–272.
- WESSOLLY, L. (2010) 25 Jahre Baumstatik – eine Bilanz. ProBaum 3: 12-15: .
- Wohn, Jörg. 2003. „Untersuchungen zur Standsicherheit von Bäumen bei Wassergehaltsänderungen im Boden“. Diplomarbeit an der FH Nürtingen. Nürtingen.