

Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen

Findings of recent research on the pulling test method

von Andreas Detter und Steffen Rust

Zusammenfassung

Der baumstatische Zugversuch ist eine etablierte zerstörungsfreie Methode zur Untersuchung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. In einem aktuellen Forschungsprojekt werden Einflussfaktoren auf das Ergebnis von Zugversuchen und die Zuverlässigkeit der Extrapolation der Belastbarkeit aus dem Zugversuch überprüft. Der Artikel beschreibt den aktuellen Stand der Untersuchungsmethode und berichtet von ersten Ergebnissen der wissenschaftlichen Arbeiten. So wird die Relevanz der im Zugversuch ermittelten Hilfsgrößen Faserstauchung und Neigung der Wurzelplatte für die Abschätzung der Tragfähigkeit aufgezeigt. Darüber hinaus wird bewertet, wie sich baumspezifische Parameter, Temperatur und Bodenfeuchte auf die Bewertung der Sicherheitsreserven auswirken.

Summary

Pulling tests are recognized as a non-destructive method to assess the strength and stability of trees. A current research project sets out to test the influence of different parameters on the result of a pulling test and the reliability of extrapolating the load bearing capacity from measured data. The paper presents today's state of the art in applying the Pulling Test Method and reports preliminary results of the scientific research. It shows the significance of auxiliary variables measured during the pulling test (fibre strain and root plate tilt under load) for the extrapolation of critical loads. Furthermore, the effect of tree specific parameters, temperature and humidity on the estimated safety margins is evaluated.

1 Einleitung

Zugversuche werden seit vielen Jahren in der biomechanischen Forschung eingesetzt, um Erkenntnisse zur Belastbarkeit von Bäumen und Waldbeständen zu gewinnen (z. B. NICOLL et al. 2006; LUNDSTRÖM et al. 2007; RUEL et al. 2010). In der Regel werden die Gehölze bei diesen Untersuchungen bis zum endgültigen Versagen durch Bruch oder Entwurzeln belastet und somit zerstört. Für die eingehende Untersuchung der Verkehrssicherheit im Rahmen der Baumpflege und Baumkontrolle werden zerstörungsfreie Verfahren benötigt, um Bäume mit erhöhter Versagensgefahr identifizieren und gleichzeitig ausreichend sichere Exemplare erhalten zu können. Gerade Altbäume verfügen vielfach über hohe Sicherheitsreserven, obwohl sie maßgebliche Defektsymptome am Holzkörper aufwei-

sen. 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. Die Grundlagen der Zugversuche wurden überwiegend in kaum noch zugänglichen Tagungsbänden oder Monographien der 1990er Jahre dargestellt. Bislang wurde die Methode nur durch wenige begutachtete Arbeiten beschrieben (z. B. WESSOLLY 1991) oder wissenschaftlich überprüft (KANE & CLOUSTON 2008; SANI et al. 2012). Basierend auf der langjährigen praktischen Erfahrung mit Zugversuchen soll in einem aktuellen

Forschungsprojekt, das von den Autoren an der HAWK Göttingen durchgeführt wird, begonnen werden, diese Lücke zu schließen. Der heutige Stand der Zugversuchsmethode und erste Ergebnisse der laufenden Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

2 Grundlagen

Grundsätzlich wird in der Baumstatik die Tragfähigkeit des Baumes den zu erwartenden Windlasten gegenübergestellt, 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 (Monitoring im natürlichen Wind, Ausschwingversuche) ermittelt werden

Bewertung: Vergleich von Tragfähigkeit und Windlast zur rechnerischen Bestimmung der Standort- und Bruchsicherheit

Der Zugversuch ist also nicht nur ein Messverfahren, das auf die mechanischen Eigenschaften des Baumes abzielt. Baumstatische Zugversuche beinhalten syste-

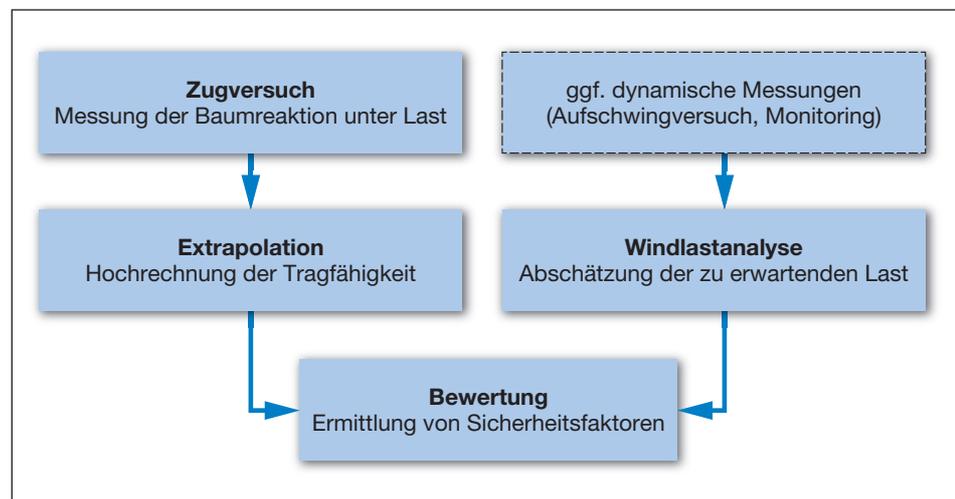
matische Auswertungsschritte, um vom Ergebnis der zerstörungsfreien Messung am Baum zu einer Bewertung der Verkehrssicherheit zu kommen und stellen damit eine in sich geschlossene Untersuchungsmethode dar (DETTNER et al. 2010).

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 im Hinblick auf den ungünstigsten Fall als Extremwertanalyse angelegt.

Grundsätzlich stellen die Messergebnisse jedoch bereits die Beziehungen zwischen den aufgetragenen Kräften und der Tragfähigkeit des Baumes dar (RUST & 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 mit den am Standort zu erwartenden Windlasten ins Verhältnis

Abbildung 1:
Schema des Untersuchungsablaufs
beim baumstatischen
Zugversuch



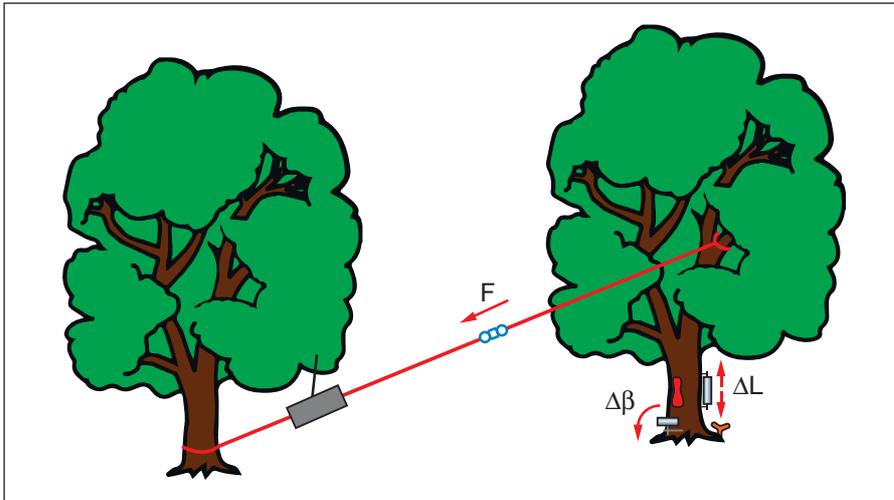


Abbildung 2:
Aufbau Zugversuch
(schematisch)

gesetzt. Daraus ergibt sich ein Sicherheitsfaktor, der ausdrückt, wie groß die Belastbarkeitsreserven des Baumes sind (Abbildung 1). 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 Sicherheitsreserven vorhanden sein.

In der Baumstatik wird üblicherweise ein Sicherheitsfaktor von 1,5 gefordert. Dieser vergleichsweise geringe Sicherheitszuschlag ist nur deshalb ausreichend, weil Bäume, anders als technische Konstruktionen, ihre Traglastreserven durch jährlichen Holzzuwachs über längere Zeit aufrechterhalten oder sogar vergrößern können. Wie lange auf diese Weise z. B. Schäden durch Holz besiedelnde Pilze kompensiert werden können, ist Teil der biologischen Beurteilung des Baumes. Um sinnvolle und zielführende Bewertungen der Verkehrssicherheit zu erhalten, ist es unerlässlich, dass erfahrene Baumsachverständige die errechneten Sicherheitsfaktoren mit den Ergebnissen der visuellen und biologischen Zustandsbewertung des Baumes verknüpfen.

3 Zugversuch: Aufbau und Durchführung

Beim Zugversuch werden mit einer Handwinde über ein in der Krone befestigtes Seil geringe quasi-statische Belastungen auf den Baum ausgeübt (Abbildung

2). Während der Baum einer zunehmenden Last ausgesetzt wird, reagieren Stamm und Wurzelplatte mit geringfügigen Verformungen, die für das menschliche Auge unsichtbar bleiben, jedoch von hoch auflösenden Messgeräten erfasst werden können. Drei Messwerte werden kontinuierlich aufgezeichnet:



Abbildung 3: Aufbau eines Zugversuchs an einem Naturdenkmal

- die auf den Baum einwirkende Kraft (F),
- die Dehnung oder Stauchung der Randfasern im Stamm (ΔL) und
- die Neigung der Wurzelplatte ($\Delta \beta$).

Diese Messdaten können an beliebig vielen Messpositionen ermittelt, elektronisch gespeichert und an einem Computer überwacht werden. Hierzu werden ein elektronischer Kraftmesser (Dynamometer) und hochauflösende Dehnungs- bzw. Neigungssensoren (Elastometer und Inclinometer) eingesetzt (Abbildung 3). 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 und biologischen Funktionsfähigkeit nicht beschädigt wird. Nach Beendigung des Zugversuchs kann mit Hilfe der gespeicherten Daten nachgewiesen werden, dass der Baum wieder in seine ursprüngliche Form und Position zurückgekehrt ist.

4 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 senkrecht zur Stammachse 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)

Die Oberfläche, die dem Wind ausgesetzt ist, wird durch die vertikale Projektion aller oberirdischen Tei-

le des Baumes (belaubte Krone und Stamm) in der gewählten Lastrichtung bestimmt. Im Zuge der Windlastabschätzung werden diese Fläche und ihre Form aus einem digitalen Foto ermittelt. Durch die Verknüpfung des Winddrucks auf einzelne Flächenanteile mit ihrer Höhe über dem Stammfuß lässt sich das Biegemoment errechnen, das am Stammfuß wirksam wird. Auf diese Weise wird zunächst nach rein statischen Ansätzen eine maximale Windlast ermittelt, die bei einem bestimmten Windereignis zu erwarten ist. Sie greift in einem fiktiven Lastschwerpunkt an, dessen Position sich anhand der Flächenanalyse rechnerisch darstellen lässt.

Geschwindigkeiten für Referenzwindereignisse können Windzonenkarten entnommen werden, die in nationalen Baustandards festgelegt sind. In vielen Fällen wird die Windlastabschätzung aber auch auf ein Windereignis abgestellt, dessen stärkste Böen in 10 m Höhe über ungestörtem Gelände eine Geschwindigkeit von knapp 120 km/h erreichen. Da auch gesunde Bäume bei stärkeren Stürmen regelmäßig versagen, werden die daraus resultierenden Schäden meist höherer Gewalt zugerechnet. Bis zu dieser Grenze sollten Bäume aber der Windbelastung standhalten können, auch wenn sie Schäden aufweisen.

Die Windgeschwindigkeit wird durch die Geländeoberfläche erheblich beeinflusst. Daher muss sie für den Standort des Baumes modifiziert werden, wofür in den europäischen Standards bestimmte Geländekategorien vorgesehen sind. Für Bäume im bebauten Umfeld ist ein weiterer Faktor erforderlich, der die lokalen Strömungsverhältnisse abbildet. Innerhalb einer Stadtstruktur können verschiedene Anordnungen von Gebäuden Tunnel- oder Düsen-Effekte hervorrufen und die Windgeschwindigkeit zusätzlich erhöhen (Abbildung 4). Das gilt insbesondere, wenn die Luft beim Umströmen hoher Gebäude beschleunigt wird. Bäume im Straßenraum können durch die raue Oberflächenstruktur ihrer Krone solchen Effekten entgegenwirken (RUCK 2005).

Für die Abschätzung der Baumreaktion werden baumartspezifische Eigenschaften und Strukturkennwerte verwendet. Anpassungen der Kronen, wie z. B. das Verringern der Lasteinzugsfläche im Wind oder ein stromlinienförmiges Ausrichten von Blättern und



Abbildung 4: Tunnel-Effekte können die Windgeschwindigkeit lokal erhöhen

Zweigen, werden durch baumartspezifische Windwiderstandsbeiwerte (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, gehen gemäß der probabilistischen Ansätze von DIN 1055-4 oder Eurocode 1 in die Berechnung ein. Hierbei werden auch Schätzgrößen für die Eigenfrequenz des Baumes und Dämpfungseffekte in der Baumkrone sowie standortspezifische Kennwerte benötigt. Die Modelle finden ihre Bestätigung in aktuellen Forschungsarbeiten zur dynamischen Reaktion von Bäumen in natürlichem Wind (z. B. JAMES 2010).

Das Ergebnis einer solchen Windlastabschätzung sind äquivalente statische Lasten, die die gleiche maximale Baumreaktion hervorrufen (z. B. in Form von Neigung oder Faserdehnung) wie die dynamische Belastung durch eine Abfolge von Windböen. Aus diesem Grund können sie mit den statischen Belastungen im Zugversuch verglichen werden, die aufgrund des Messaufbaus selbst keine dynamischen Elemente beinhalten.

5 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. Die so geschätzten zulässigen Lasten werden dann mit der zu erwartenden Bemessungswindlast verglichen. Die Extrapolation erfolgt in der Regel mit Hilfe von Spezialsoftware (z. B. *Arbostat*, www.arbosafe.com) und wird nachfolgend im Grundsatz erläutert.

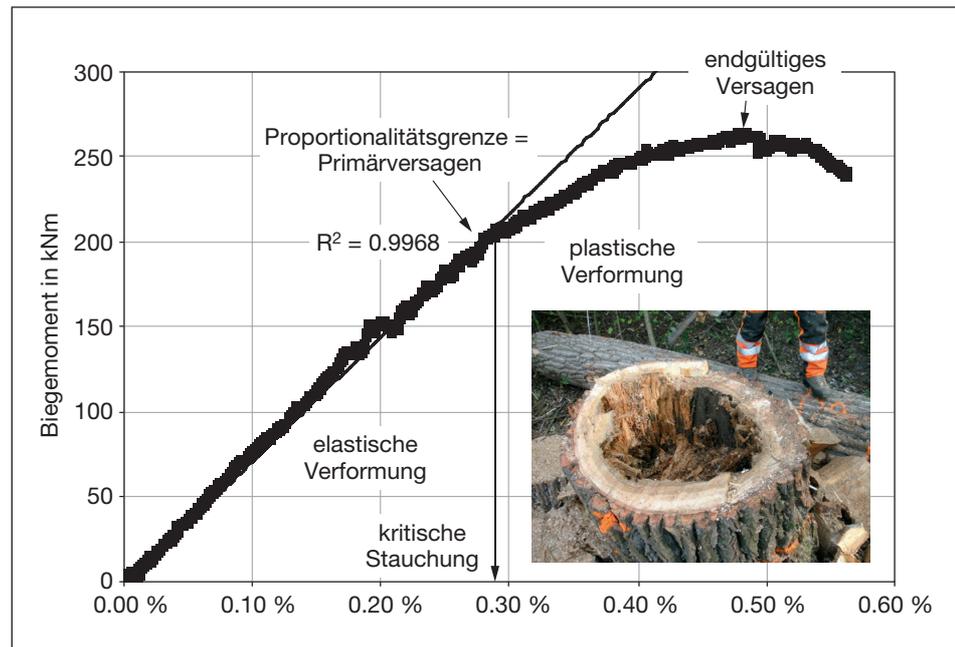
5.1 Biegebelastbarkeit des Stammes

Für die Bewertung der Widerstandskraft gegen Stammbruch unter Biegung wird als Bezugswert die Proportionalitätsgrenze des grünen Holzes genutzt. Bis zu diesem Punkt ist die Verformung der Fasern voll elastisch, so dass der Holzkörper nicht geschädigt wird und nach Ende der Belastung in seinen Ursprungszustand zurückgeht. Oberhalb dieses Grenzwertes tritt das sog. 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 dargestellten Beispiel (Abbildung 5) wurde eine Pappel (*Populus × canadensis* MOENCH.) mit rund 70 cm Stammdurchmesser, deren Stamm eine ausgedehnte zentrale Fäule aufwies, bis zum Bruch gezogen. Die Messungen wurden vom SV PROSENZ und den Österreichischen Bundesforsten durchgeführt. Aus dem Verlauf der aufgezeichneten Faserstauchungen wird deutlich, dass sich das Verhalten der überwachten Randfasern des Stammes ab einer Verkürzung um rund 0,3 % ändert. Während sie bis zu diesem Punkt linear, d. h. proportional zur einwirkenden Belastung gestaucht wurden, nimmt ihre Verformung nun deutlich rascher zu. Daher wird dieser Wert als Proportionalitätsgrenze bezeichnet.

Vergleicht man Individuen einer Baumart oder die Mittelwerte verschiedener Baumarten, so steigen die Festigkeit und Elastizität grüner Hölzer mit der Holz-

Abbildung 5:
Last-Verformungs-
diagramm einer
hohlen Pappel
(Daten/Foto R. PROENZ)



dichte (KNIGGE & SCHULZ 1966; VAN GELDER et al. 2006; NIKLAS & SPATZ 2010; BORK et al. 2012). Dieser Zusammenhang ist aber nicht konstant, sondern verändert sich, z. B. in Abhängigkeit vom Klima (ONODA et al. 2010). Laborwerte aus Kanada deuten darauf hin, dass die Proportionalitätsgrenze bei Biegung mit dem endgültigen Versagen der Holzfasern auf der Druckseite zusammenhängt (JESSOME 1977). Falls sich dieser Zusammenhang in weiteren Versuchen auch für den Einzelbaum bestätigt, kann die Festigkeit des Holzes unter axialer Kompression als Bezugswert für die Proportionalitätsgrenze auf Biegung dienen.

Um die Belastbarkeit eines Stammes abzuschätzen, werden die gemessenen Faserverformungen bis zum Richtwert für die Proportionalitätsgrenze extrapoliert. Diese Hochrechnung kann immer dann mit hoher Genauigkeit erfolgen, wenn eine große Anzahl von Messwerten (≥ 50) über einen ausreichend großen Teil des elastischen Bereiches (Dehnung ≥ 10 Prozent der Proportionalitätsgrenze) erhoben wird und diese hochgradig linear mit der einwirkenden Last korrelieren ($R^2 > 0,97$). Werden deutlich weniger Messwerte (nur 5 bis 10) erfasst, muss die Faserverformung im Zugversuch mindestens ein Drittel der Proportionalitätsgrenze erreichen, um bei ähnlichem Bestimmtheitsmaß ein zufriedenstellend genaues Ergebnis zu gewährleisten. Wie zuverlässig sich die Grenzbelastbarkeit des Stammes auf diese Weise aus

dem Ergebnis des zerstörungsfreien Zugversuchs ableiten lässt, ist derzeit Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (vgl. Kap. 6).

5.2 Verankerungskraft des Wurzelsystems

Die Verankerungskraft der Wurzeln wird anhand des typischen Neigungsverhaltens von Bäumen extrapoliert (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 einwirkende Last nach einer Potenzfunktion 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). Daher stellt der zweite Schritt der Auswertung heute nicht mehr auf einen einheitlichen Verlauf der Neigungskurve ab. Stattdessen wird die Kipplast abgeschätzt, indem die für eine Neigung von

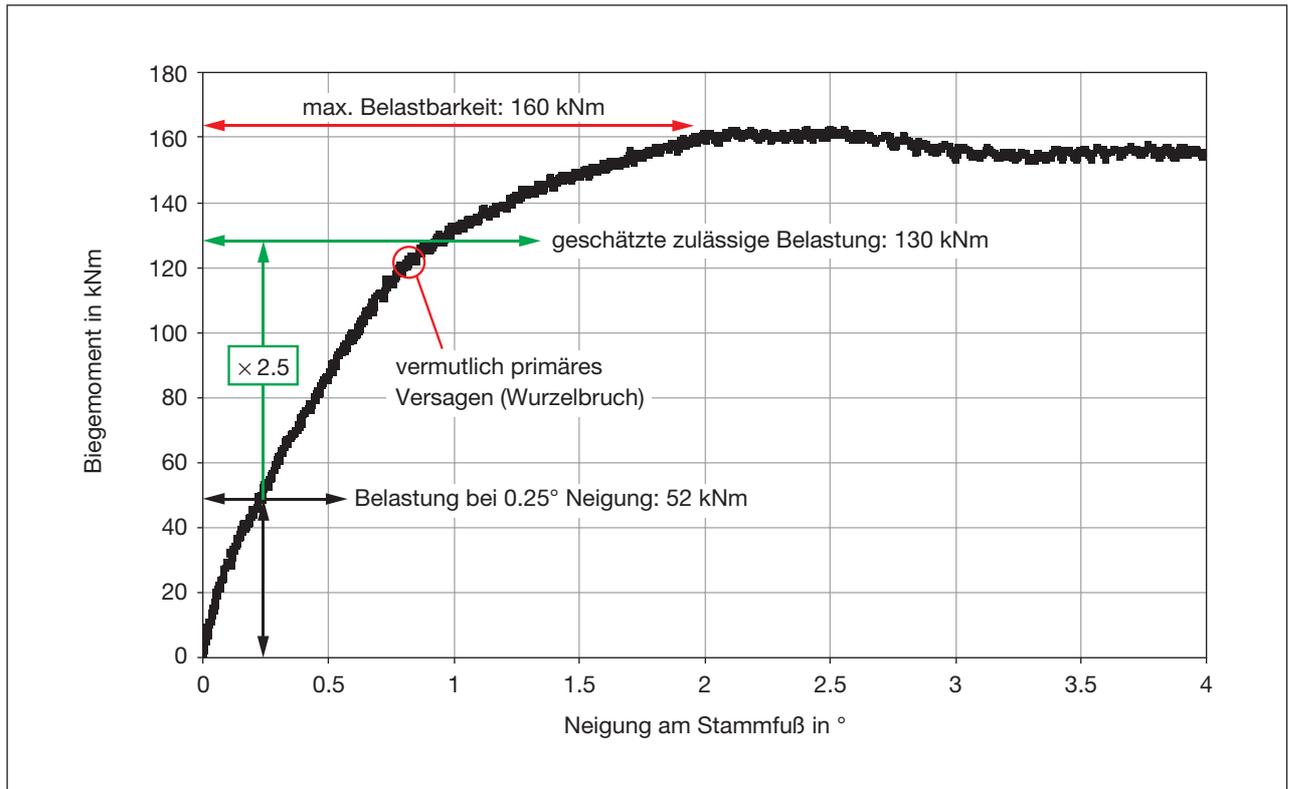


Abbildung 6: Kippverlauf für eine Linde mit Brandkrustenpilzbefall (Auszug)

0,25° erforderliche Last unabhängig von Baumart und Boden mit einem festen Faktor hochgerechnet wird (z. B. 2,5 nach WESSOLLY 1996). Teils werden Modifikationen nach Baumart und Bodeneigenschaften vorgenommen, teils werden Neigungsdaten auch auf grundlegend andere Weise ausgewertet, um die Standsicherheit des Baumes zu ermitteln (z. B. AfB-Methode, SINN 2003).

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 (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 5° (Abbildung 6).

6 Aktuelle Untersuchungsergebnisse zur Extrapolation

Die laufenden wissenschaftlichen Untersuchungen sollen zum einen überprüfen, ob die im Zugversuch ermittelten Hilfswerte (Verformung der Randfasern des Stammes und Neigung der Wurzelplatte unter Einwirkung einer Biegebelastung) tatsächlich zuverlässige Indikatoren für die Tragfähigkeit eines Baumes darstellen. Zum anderen sollen Verfahren entwickelt werden, mit deren Hilfe die bislang bekannten Grenzwerte und Hochrechnungsfaktoren erweitert und verbessert werden können. Dies zielt darauf, sie an individuelle Gegebenheiten bei der Messung, an Eigenschaften der untersuchten Bäume oder an bestimmte Standortbedingungen anpassen zu können.

6.1 Relevanz der Messparameter

Die derzeit eingesetzten Verfahren zur Hochrechnung der Messergebnisse aus dem Zugversuch wurden im Kapitel 5 bereits dargestellt. Durch Zugversuche an Bäumen, bei denen die Gehölze bis zum Versagen belastet werden, soll diese Vorgehensweise auf wissenschaftlicher Basis verifiziert werden. Für die Untersu-

chungen wurden Instrumente des Typs TreeQinetic der Fa. argus electronic GmbH, Rostock, eingesetzt.

6.1.1 Gradient über Biegemoment und Faserstauchung

Als Eingangsparameter der Hochrechnung wird bei der Abschätzung der Bruchsicherheit ein Maß für die Biegesteifigkeit des Stammes verwendet, das im Zugversuch ermittelt wird. Der Zusammenhang zwischen dem einwirkenden Biegemoment und der erzielten Verformung (Dehnung oder Stauchung) der Randfasern lässt sich als Gerade abbilden (vgl. Abbildung 5). Die Steigung dieser Geraden wird gemeinsam mit baumartspezifischen Grenzwerten in der Auswertesoftware Arbostat verwendet, um die Tragfähigkeit des Stammes abzuschätzen.

Im Rahmen der Tree Biomechanics Research Week, die 2010 von der International Society of Arboriculture (ISA) in Ohio veranstaltet wurde, konnte diese Vorgehensweise an neun Platanen (*Platanus × hispanica* MÜNCHH.), die teils erhebliche Vorschäden aufwiesen, wissenschaftlich überprüft werden. Zunächst wurde in zerstörungsfreien Zugversuchen im üblichen Verfahren die Steigung der Ausgleichsgeraden über Biegemoment und erzielte Randfaserstauchung aufgezeichnet. Um die Proportionalitätsgrenze zu bestimmen, wurden die Bäume in einem zweiten Schritt bis zum Bruch gezogen.

Durch die Hochrechnung der Faserstauchungen aus dem Zugversuch bis zur festgestellten Versagensgrenze lässt sich zum einen die kritische Stauchung der Randfasern für die untersuchten Bäume bestimmen (vgl. Abbildung 7). Zugleich erlaubt die Untersuchung einer Population von Bäumen Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der Hochrechnung der Tragfähigkeit aus der Steigung der Ausgleichsgeraden. Zwischen diesem Parameter (Stauchbarkeit) und dem Biegemoment bei Erreichen der Proportionalitätsgrenze (Primärversagen) wurde eine sehr hohe Korrelation ($R^2 = 0,97$) ermittelt (Abbildung 8). Die Untersuchung weist also darauf hin, dass die im Zugversuch verletzungsfrei ermittelten Daten, die im Grunde nur die Biegesteifigkeit des Stammes abbilden, einen sehr guten Indikator für die

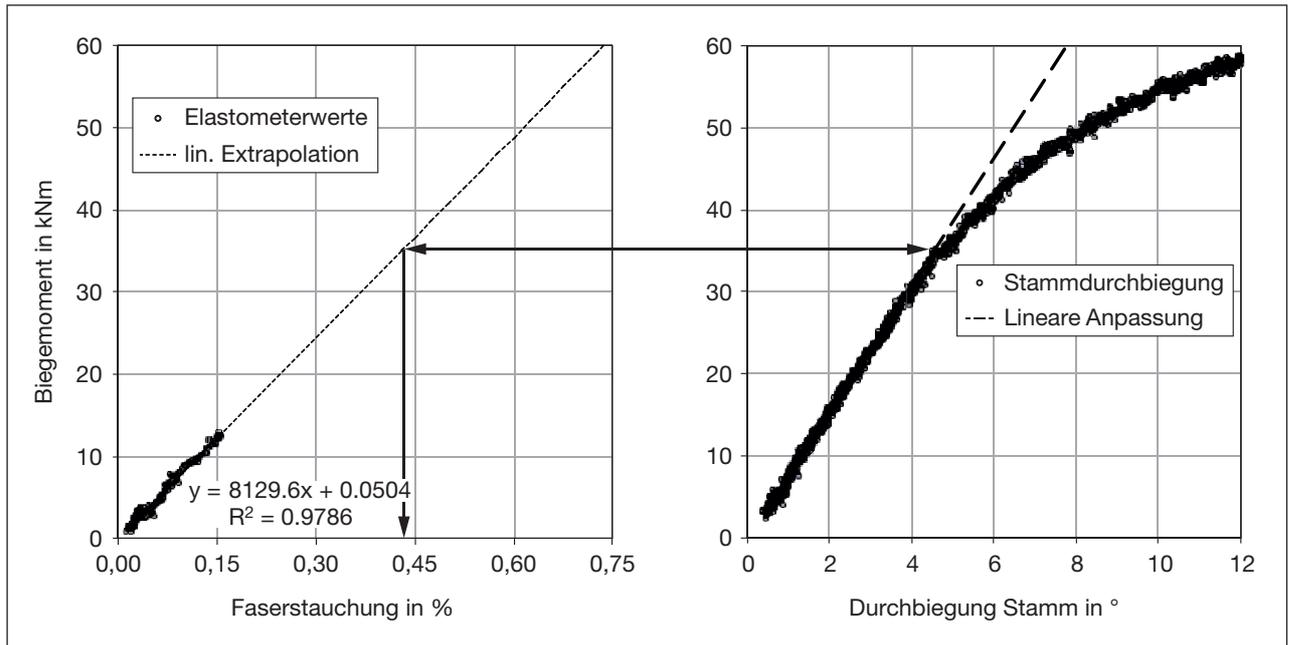


Abbildung 7: Ermittlung der Grenzdehnung Platane Nr. 7, Ohio

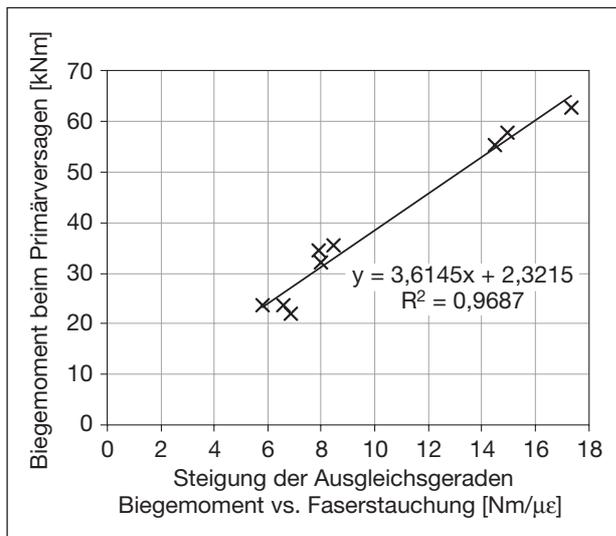


Abbildung 8: Stauchbarkeit als Indikator für Primärversagen

kritische Belastung bei Eintritt des Primärversagens, also für die Festigkeit des Stammes, darstellen.

6.1.2 Biegemoment bei 0,25° Stammfußneigung

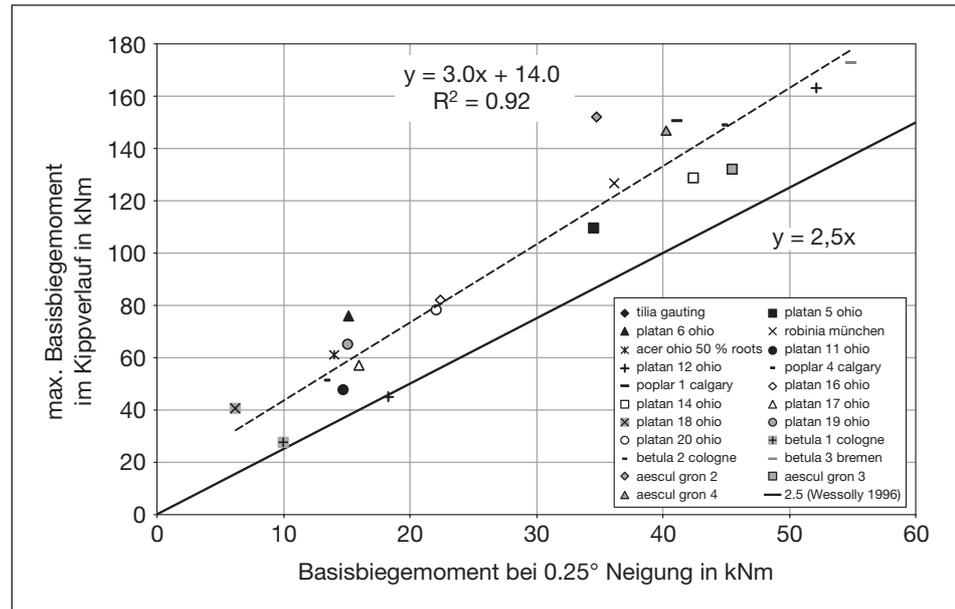
Die Hochrechnung der Kipplast basiert auf einem engen Zusammenhang zwischen dem Biegemoment, das zum Erreichen einer geringen Neigung am Stammfuß

erforderlich ist, und der maximalen Belastung beim Kippversagen des Baumes. Eine solche Korrelation wurde nicht nur von WESSOLLY (1996) beschrieben, sondern auch bei SMILEY et al. (2008) für Jungbäume festgestellt.

In Abbildung 9 wurden die Daten für etwa 20 Einzelbäume zusammengefasst, die teils erhebliche Schäden am Wurzelsystem aufwiesen. Sie stocken an Straßen, in Parks 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 $0,25^\circ$ Neigung als Indikator für die Kipplast dieser Bäume geeignet ist. Auch wissenschaftliche Untersuchungen an drei Pinien (*Pinus pinea* L.) auf städtischen Standorten in Italien haben gezeigt, dass dieses Verfahren wertvolle Informationen über die Verankerungskraft der Bäume erbringt (SANI et al. 2012).

Im Rahmen der laufenden Untersuchungen wurden zahlreiche ungeschädigte Bäume bis zum Versagen belastet. Dabei wurde ein allgemeiner Zusammenhang dokumentiert, der über die Hochrechnung der Verankerungskraft hinausgeht. Von der Belastung, die $0,25^\circ$ Neigung am Stammfuß hervorruft, konnte bei diesen Bäumen auf die kritische Belastung geschlossen werden, auch wenn tatsächlich der Stamm brach

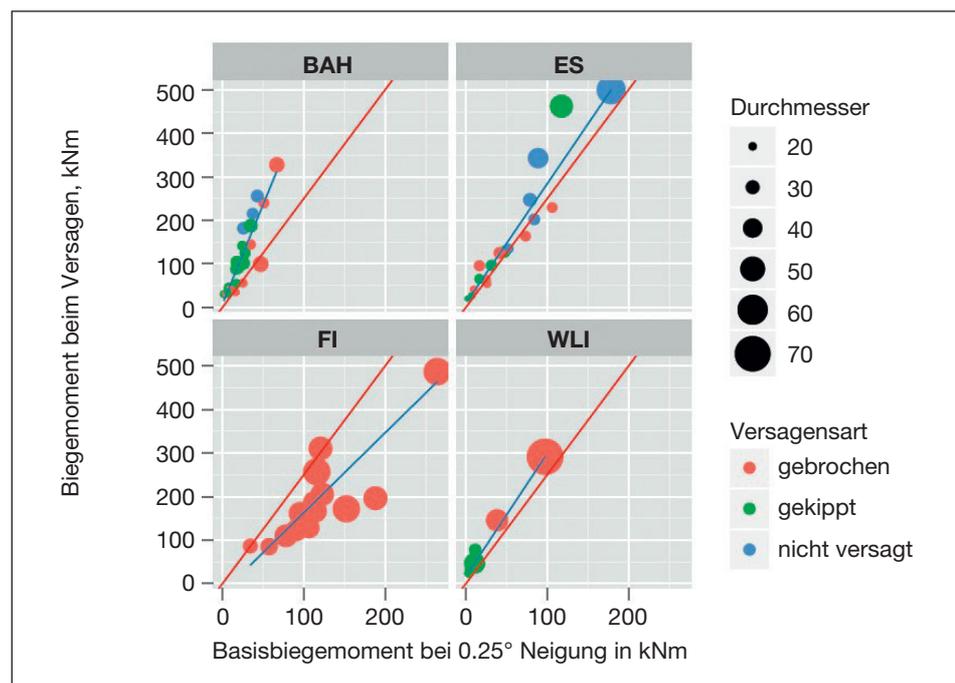
Abbildung 9:
Hochrechnung der
Kipplast aus dem
0,25°-Moment



und die Gehölze gar nicht entwurzelt wurden. Derzeit ist noch nicht geklärt, in welchen Fällen das Biegemoment bei 0,25° Stammfußneigung als genereller Indikator der Versagenslast geeignet ist. Insbesondere wenn maßgebliche Defekte am Stamm vorliegen, erscheint dies wenig wahrscheinlich. Allerdings wird die

Annahme, dass ein solcher Zusammenhang auch für andere Bäume besteht, durch eine Analyse von Zugversuchsergebnissen gestützt, nach denen Stand- und Bruchsicherheit vielfach auf einem ähnlichen Niveau liegen (WESSOLLY 2004).

Abbildung 10:
Biegemoment bei 0,25°
Neigung als Versagens-
indikator (rote Linie:
hochgerechnete Versagens-
last, blau: Regressionsgerade,
Durchmesser in cm;
BAH: Bergahorn,
ES: Esche, FI: Fichte,
WLI: Winterlinde)



6.2 Einflussfaktoren und Grenzen der Hochrechnung

Zurzeit werden die Einflüsse der Baumart, des Schädigungsgrades, der klimatischen Bedingungen und der Bodenparameter auf das Ergebnis von Zugversuchen wissenschaftlich untersucht. Erste Ergebnisse dieser Arbeit an der HAWK Göttingen finden sich auch in diesem Jahrbuch. Art und Größenordnung der Einflüsse können Hinweise für mögliche Einschränkungen bei der Durchführung von Zugversuchen liefern. Gleichzeitig ermöglichen sie die Wahl geeigneter Sicherheitsbeiwerte, um so die Streubreite der Ergebnisse und Unwägbarkeiten bei der Hochrechnung zu kompensieren. Nachfolgend werden einige Beispiele für den Einfluss verschiedener Parameter auf das Ergebnis von Zugversuchen dargestellt, die bislang in Forschungsarbeiten beleuchtet wurden.

6.2.1 Baumspezifische Eigenschaften

Bei der Hochrechnung müssen unterschiedliche Richtwerte für die jeweilige Baumart angesetzt werden, die derzeit meist dem Stuttgarter Festigkeitskatalog (WESSOLLY & ERB 1998) entnommen werden. Durch die bisherigen Untersuchungen wird deutlich, dass zum Beispiel das Alter der Bäume durchaus einen Einfluss auf Materialeigenschaften des Holzes hat. Die Fasern junger Bäume weisen zwar geringere Druckfestigkeit, aber höhere kritische Stauchung auf. Die Ursache hierfür liegt möglicherweise im niedrigen Elastizitätsmodul des juvenilen Holzes, das den Stamm in den ersten zehn Jahren dominiert. Bleibt dies unberücksichtigt, wird die Bruchsicherheit junger Bäume unterschätzt.

Auch innerhalb einer Baumart und Altersgruppe tritt eine gewisse Streubreite der für die Auswertung verwendeten Materialeigenschaften auf. Im Fall der oben beschriebenen Untersuchungen an Platanen in Ohio wurden innerhalb der Stichprobe von neun Bäumen Abweichungen von rund 15 % um den Mittelwert der kritischen Faserstauchung ermittelt. Diese vergleichsweise geringe Variabilität trat auf, obwohl sowohl schadfreie Stämme als auch Bäume mit teils ausgeprägten Schäden gebrochen wurden. Möglicherweise sind solche Bruchversuche an ganzen Stämmen

grundsätzlich besser für die Ermittlung artspezifischer Richtwerte für Zugversuche geeignet als Laboruntersuchungen an kleinen Prüfkörpern, bei denen viel größere Schwankungen zu beobachten sind (ZOBEL & VAN BUIJTENEN 1989; BORK et al. 2012).

Auch in Bezug auf das Biegemoment bei 0,25° Stammfußneigung lassen sich Unterschiede zwischen verschiedenen Baumarten erkennen (vgl. Abbildung 10). Während für Eschen (*Fraxinus excelsior* L.) und Winter-Linden (*Tilia cordata* MILL.) der Faktor 2,5 eine gute Näherung für die Hochrechnung der Versagenslast darstellte, lag dieser Wert für Berg-Ahorne (*Acer pseudoplatanus* L.) mit ähnlichem Durchmesser deutlich höher (Faktor 4,5). Bei Anwendung der bisherigen Berechnungsweise würde dies bedeuten, dass die tatsächliche Sicherheit dieser Berg-Ahorne unterschätzt wird. Der Befund soll nun für Bäume an anderen Standorten und mit anderen Dimensionen überprüft werden. Auch bei Rot-Fichten (*Picea abies* (L.) H. KARST.) im Bestand zeichnet sich ab, dass die Korrelation sich von anderen Baumarten unterscheidet. Die Bäume brachen deutlich unterhalb der Belastung, für die das Kippversagen erwartet wurde (vgl. Abbildung 10). Nach Beobachtungen von BADER (2000) könnte dieser Effekt auf arttypische Wurzelverwachsungen zurückzuführen sein, die die Verankerung wie eine hoch belastbare „Wurzelmatte“ verstärken.

6.2.2 Klimatische Einflüsse auf den Zugversuch

Die Auswirkungen klimatischer Parameter auf das Ergebnis baumstatischer Zugversuche wurden an einer Baumreihe über den Jahresgang aufgezeichnet (MICHAELIS 2012). Als Versuchsbäume wurden neun Winter-Linden mit Durchmessern zwischen 40 und 60 cm an einem innerstädtischen Standort ausgewählt. Der Standort ist tiefgründig und besteht aus einem Kies-Sand-Gemisch mit weniger als 10 % Feinkornanteil. Die Stand- und Bruchsicherheit der Bäume wurde an fünf verschiedenen Tagen aus dem zerstörungsfreien Zugversuch geschätzt. Dabei wurde stets die gleiche Versuchsanordnung gewählt.

Die erste Messung wurde im März 2011 durchgeführt, die letzte im Februar 2012. Als Bezugswerte wurden

die Luft- und Bodentemperatur sowie teils die Oberflächentemperatur des Stammes und die Bodenfeuchte festgehalten. Die Abweichungen der errechneten Sicherheiten wurden für jeden Baum in Relation zur geringsten ermittelten Sicherheit gesetzt (Abbildung 11). Diese sollte aus Sicherheitsgründen den Bezugswert bilden. Bei fast allen Bäumen handelt es sich dabei um die erste Messung im März 2011.

Während der ersten vier Messungen ergaben sich bei der Bruchsicherheit im Einzelfall Abweichungen von bis zu 15 %, hinsichtlich der Standsicherheit betrug die Abweichung maximal 30 %. Im Mittel über alle Bäume wurde allerdings nicht mehr als 5 bis 10 % Unterschied festgestellt. Die Bodentemperatur variierte dabei von 2 bis 22 °C, die Lufttemperatur von 10 bis 26°.

Eine viel größere Abweichung ergab sich jedoch aus einer Messung, die im Februar 2012 bei starkem Frost mit Lufttemperaturen um -10° , Oberflächentemperaturen des Stammes von -15° und tief durchgefrorenem Boden durchgeführt wurde. Aus dieser Messung leiten sich Sicherheitsfaktoren ab, die die minimale Sicherheit gegen Kippen im Mittel um den Faktor 2, im Extrem sogar nahezu um den Faktor 2,4 zu hoch angeben. Auch im Hinblick auf das Bruchversagen wurde die Sicherheit im Mittel um ca. 30 % überschätzt.

Die Beobachtungen werden in ähnlicher Form für acht Birken (*Betula pendula* R.) bestätigt, für die in einer gleichartigen Reihenuntersuchung der Einfluss der Temperatur auf das Messergebnis belegt wurde (RUST et al. 2013).

6.2.3 Einfluss von Bodenparametern

Der Einfluss der Bodenfeuchte und der Bodenart auf das Ergebnis von Zugversuchen wurde bislang noch nicht in großem Umfang dokumentiert (DUPUY et al. 2007). Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes wurden Versuche durchgeführt, um die Auswirkungen einer starken Wasserzuführung auf die Nachgiebigkeit der Wurzel-Boden-Matrix festzustellen. Auch bei den ersten Arbeiten im Zuge der Entwicklung baumstatischer Zugversuche wurde der Wurzelbereich vor der Untersuchung stark bewässert, um

bewusst die Scherfestigkeit des Bodens herabzusetzen (SINN 1990).

Nach bisheriger Kenntnis muss davon ausgegangen werden, dass die Verankerung mit steigendem Wassergehalt des Bodens geschwächt wird. In den bisherigen Versuchen wurden signifikante Auswirkungen auf die abgeleiteten Sicherheitswerte festgestellt. Je nach Bodenart ist mit unterschiedlich starken Veränderungen der ermittelten Standsicherheitswerte zu rechnen. Bei sieben Bäumen an einem Straßenstandort wurde die rechnerische Standsicherheit durch eine Zunahme der Bodenfeuchtigkeit um 40 bis 50 % nur im Bereich von maximal 15 % vermindert (FUCHS 2012). Dies stimmt überein mit WOHN (2003), der am städtischen Standort ähnliche Einflüsse auf den Zugversuch feststellte.

Die bodenmechanischen Grundlagen legen nahe, dass ein extremer Bodenwassergehalt den Kippvorgang maßgeblich beeinflussen könnte. Dies wird insbesondere für das Zusammenwirken von starker Schwingung im Sturm und massivem Niederschlag, z. B. während eines Taifuns, vermutet (KAMIMURA et al. 2011). Solche Effekte wurden aber bislang lediglich mit Hilfe statischer Zugversuche untersucht. Dynamische Versagensvorgänge, wie z. B. ein progressives Versagen der Verankerungswurzeln im Sturm, wurden bislang noch nicht messtechnisch erfasst.

7 Ausblick

Dynamische Ansätze spielen zwar bei der Ermittlung der Windlast eine bedeutende Rolle, können aber bislang noch keine Angaben zu Versagensgrenzen liefern. Hierfür wird noch immer das Zusammenspiel mit statischen Prüfverfahren benötigt. Dennoch sollte auch weiterhin darauf hingearbeitet werden, die bei baumstatischen Zugversuchen zur Auswertung herangezogenen Richtwerte auch im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit unter natürlichen Belastungsbedingungen zu überprüfen.

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

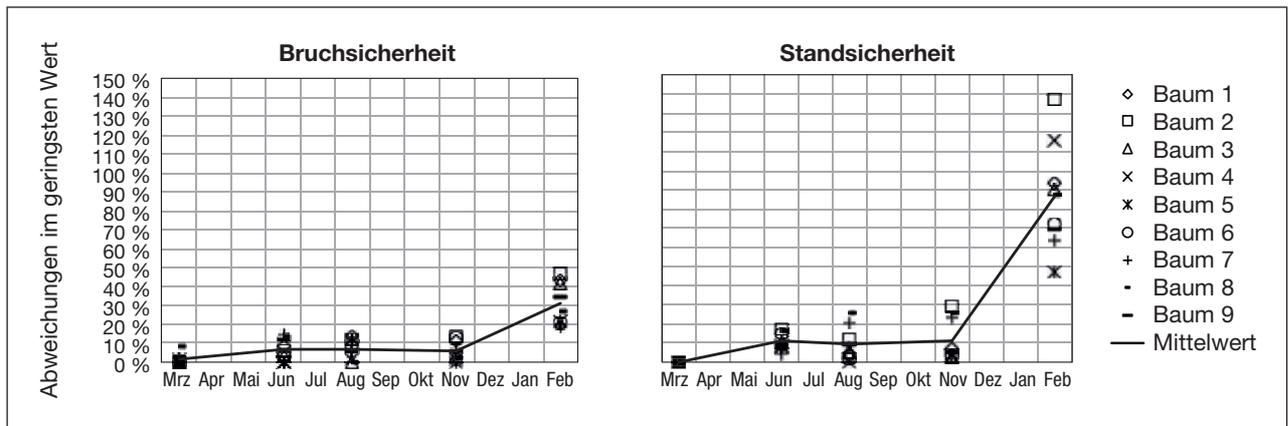


Abbildung 11: Sicherheiten bei Messung an Linden zu verschiedenen Zeitpunkten (Daten aus MICHAELIS 2012)

Untersuchungen, wonach die verwendeten Auswertverfahren und Grenzwerte grundsätzlich sachlich richtig sind und die Sicherheitsreserven nicht zu hoch geschätzt werden. Unter diesem Aspekt verdienen bei der weiteren Forschung mögliche Einschränkungen und Grenzen der Methode besondere Beachtung, ebenso wie bislang unberücksichtigte Einflussfaktoren oder Parameter, die spezifische Anpassungen der Grenzwerte und Hochrechnungsfaktoren erlauben könnten.

Dank

Für zahlreiche fruchtbare Diskussionen und Anregungen sowie die Überlassung von Daten aus eigenen Versuchen bzw. der Sachverständigentätigkeit danken wir insbesondere den Mitgliedern der SAG Baumstatik e.V. sowie vielen anderen Mitarbeitern und Kollegen. Den niedersächsischen Landesforsten danken wir für die wertvolle Unterstützung. Das Projekt wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Literatur

BADER, C., 2000: Untersuchungen über den statisch wirksamen Wurzelraum. Diplomarbeit, Fachhochschule Nürtingen, Landspflege, 57 S.
 BAKER, C. J., 1997: Measurements of the natural frequencies of trees. *Journal of Experimental Botany*, 48 (310), 1125–1132.
 BORK, R.; DÜSTERDIEK, S.; DETTER, A.; RUST, S., 2012: Vergleich von Zugversuchen und Materialtests an Kleinproben. In: DUJESIEF-KEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege*. Haymarket Media, Braunschweig, 237–242.

COUTTS, M. P., 1983: Root architecture and tree stability. *Plant and Soil*, (71), 171–188.
 DIN EN 1991-1-4/AN, 2010: *Actions on Structures – Part 4 – Wind Effects*, German National Annex, 41 S.
 DETTER, A.; BRUDI, E.; BISCHOFF, F., 2010: Messverfahren und Bewertungsmethoden zur Verkehrssicherheit. *AFZ-DerWald* (8), 34–35.
 DUPUY, L.X.; FOURCAULT, T.; LAC, P.; STOKES, A., 2007: A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture. *American Journal of Botany*, 94 (9), 1506–1514.
 FUCHS, C., 2012: Einfluss der Bodenfeuchte auf das Ergebnis von Standsicherheitsuntersuchungen durch Zugversuche. Bachelorarbeit, HAWK HHG, Arboristik, 38 S.
 GELDER, H. A.; VAN, L.; POORTER, F.; STERCK, J., 2006: Wood mechanics, allometry, and life-history variation in a tropical rain forest tree community. *New Phytologist* 171, 367–378.
 JAMES, K., 2010: A dynamic structural analysis of trees subject to wind loading. PhD Thesis, Univ. Melbourne, 277 S.
 JAMES, K.; HALLAM, C.; SPENCER, C., 2013: Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading. *Agricultural and Forest Meteorology* 168, 160–167.
 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, 37 S.
 JONSSON, M. J., 2007: Energy absorption of trees in a rockfall protection forest. Dissertation. Zürich, 222 S.
 KAMIMURA, K.; KITAGAWA, K.; SAITO, S.; MIZUNAGA, H., 2011: Root anchorage of hinoki (*Chamaecyparis obtusa* (SIEB. et ZUCC.) ENDL.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments. *European Journal of Forest Research* 131.1, 219–227.
 KANE, B.; CLOUSTON P., 2008: Tree Pulling Tests of Large Shade Trees in the Genus *Acer*. *Urban Forestry & Urban Greening* 34 (2), 101–109.
 KNIGGE, U.; SCHULZ, H., 1966: *Grundriß der Forstbenutzung*. Springer Verlag, Hamburg, 584 S.
 LAVERS, G. M., 1983: *The strength properties of timber*. 3rd edition, Building Research Establishment Report, Watford, UK, 60 S.

- LUNDSTRÖM, T.; JONAS, T.; STÖCKLI, V.; AMMANN, W., 2007: Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology* (27), 1217–1227.
- MICHAELIS, P., 2012: Der jahreszeitliche Einfluss auf die Ergebnisse von Zugversuchen. Bachelorarbeit, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Landschaftsarchitektur, 76 S.
- ONODA, Y.; RICHARDS, A. E.; WESTOBY, M., 2010: The relationship between stem biomechanics and wood density is modified by rainfall in 32 Australian woody plant species. *The New Phytologist*, 185(2), 493–501.
- RUCK, B., 2005: Über die Aerodynamik der Bäume. In: BTU Cottbus: Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik.
- RUST, S.; DETTER, A.; FUCHS, C.; SCHIRUTSCHKE, B., 2013: Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege*, Haymarket Media, Braunschweig, 296–300.
- RUST, S.; WEIHS, U., 2007: Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung. In: DUJESIEFKEN, D.; KOCKERBECK, P. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2007*, Haymarket Media, Braunschweig, 215–241.
- SANI, L.; LISCI, R.; 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, 218–226.
- SINN, G., 1990: Untersuchungen zur Kippursache von Eichen im Riederwald Frankfurt/M.. Bd. LP 25. Schriftenreihe Taxationspraxis. SVK-Verlag, Erndtebrück, 199 S.
- SINN, G., 2003: Baumstatik. Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft, Thalacker Medien, Braunschweig, 184 S.
- SINN, G.; WESSOLLY, L., 1989: Baumstatik – zwei neue zerstörungsfreie Messverfahren. Teil 1: Ermittlung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen durch Messung. *Das Gartenamt* 38 (7), 422–428.
- SMILEY, T., 2008: Root Pruning and Stability of Young Willow Oak. *Arboriculture & Urban Forestry* 34 (2), 123–128.
- 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., 1996: Standsicherheit von Bäumen. *Stadt und Grün* 4, 268–272.
- WESSOLLY, L., 2004: Baumdiagnose – Eingehende Untersuchung mittels Zugversuch – Ergebnisse. *Pro Baum* 1, 2–3.
- WESSOLLY, L., 2010: 25 Jahre Baumstatik – eine Bilanz. *Pro Baum* 3, 12–15.
- WESSOLLY, L.; ERB, M., 1998: *Handbuch der Baumstatik + Baumkontrolle*. Berlin, Patzer, 270 S.
- WOHN, J., 2003: Untersuchungen zur Standsicherheit von Bäumen bei Wassergehaltsänderungen im Boden. Diplomarbeit, FH Nürtingen, Landespflege, 116 S.
- ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P., 1989: *Wood variation, its causes and control*, Springer-Verlag, Berlin, 363 S.

Autoren

Andreas Detter ist Diplom-Ingenieur der Landespflege, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger und Mitinhaber des Sachverständigenbüros Brudi & Partner TreeConsult in Gauting. Auf zahlreichen Seminaren im In- und Ausland bildet er u. a. Sachverständige in der Anwendung baumstatischer Zugversuche aus. Er wirkte an mehreren internationalen Forschungsprojekten zur Biomechanik der Bäume mit und ist seit 2010 Mitglied des Vorstands der SAG Baumstatik e. V.

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



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

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

