

Zum Kippverhalten von Bäumen

Resultate aktueller wissenschaftlicher Untersuchungen



Dipl.-Ing. Andreas Detter

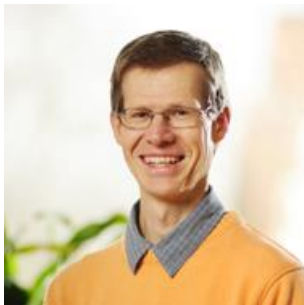
Brudi & Partner TreeConsult, Baumsachverständige
Berengariastr. 7; 82131 Gauting

Tel.: +49-(0)89-752150; Fax: +49-(0)89-7591217

Mail: a.detter@tree-consult.org

Web :www.tree-consult.org

Von der IHK für München u. Oberbayern öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Baumpflege, Verkehrssicherheit von Bäumen, Baumwertermittlung



Professor Dr. Steffen Rust

HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen

Fakultät Ressourcenmanagement

Büsgenweg 1a (Raum 140)

37077 Göttingen

Tel.: +49/551/5032-173; Fax: +49/551/5032-200 173

Mail: Rust@hawk-hhg.de

Web: www.hawk-hhg.de

Inhaltsverzeichnis

- 1 Grundlagen**
- 2 Zugversuch: Aufbau und Durchführung**
- 3 Verankerungskraft des Wurzelsystems**
- 4 Aktuelle Untersuchungsergebnisse zum Kippverhalten**
 - 4.1 Relevanz der Messparameter der Zugversuchsmethode
 - 4.2 Jahreszeitliche Einflüsse auf die Verankerungskraft
 - 4.3 Einfluss von Bodenparametern
 - 4.4 Modelle für den Kippvorgang
- 5 Zusammenfassung**
- 6 Literatur**

Einleitung

Zugversuche werden seit vielen Jahren in der biomechanischen Forschung eingesetzt, um Erkenntnisse zur Belastbarkeit von Bäumen und Waldbeständen zu gewinnen (z.B. 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 belassen zu können. Gerade Altbäume verfügen vielfach über hohe Sicherheitsreserven, obwohl sie

maßgebliche Defektsymptome 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. Die Grundlagen der Zugversuche wurden überwiegend in kaum noch zugänglichen Tagungsbänden oder Monographien der 1990er Jahre dargestellt. Bislang wurde die Methode nur durch wenige wissenschaftlich 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 an der HAWK Göttingen begonnen werden, diese Lücke zu schließen (vgl. DETTER & RUST 2013).

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 (Monitoring im natürlichen Wind, Ausschwingversuche) ermittelt werden
- 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 (DETTTER 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 aufgebrachten 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.

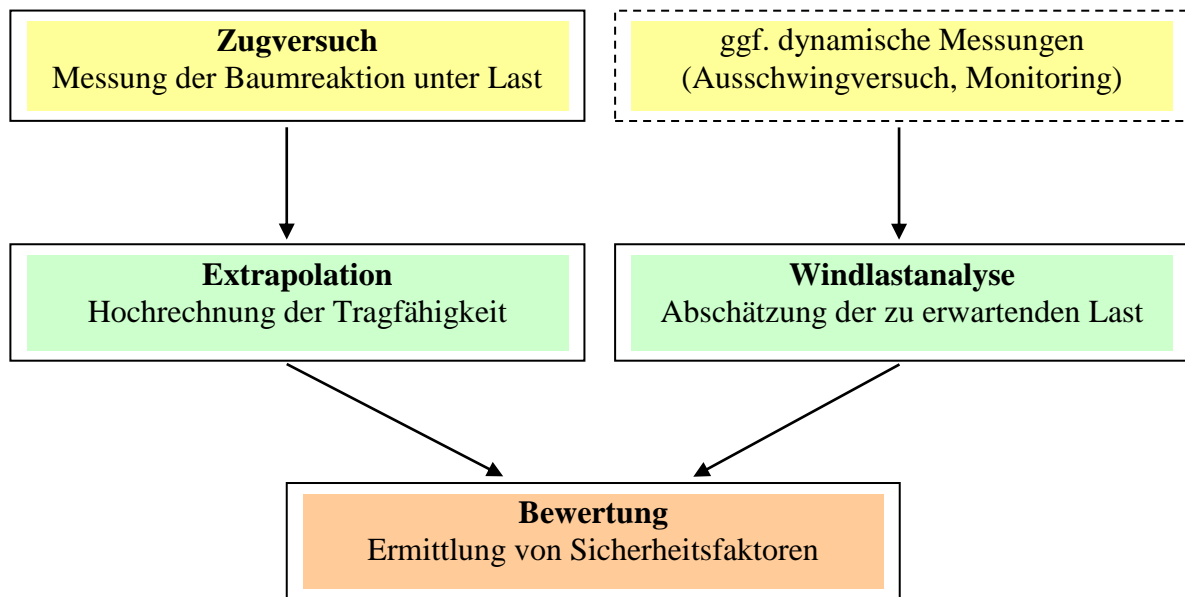


Abb. 1 Schema des Untersuchungsablaufs beim baumstatischen Zugversuch

Die so geschätzte Tragfähigkeit wird mit den am Standort zu erwartenden Windlasten ins Verhältnis gesetzt. Daraus ergibt sich ein Sicherheitsfaktor, der ausdrückt, wie groß die Belastbarkeitsreserven des Baumes sind (Abb. 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.

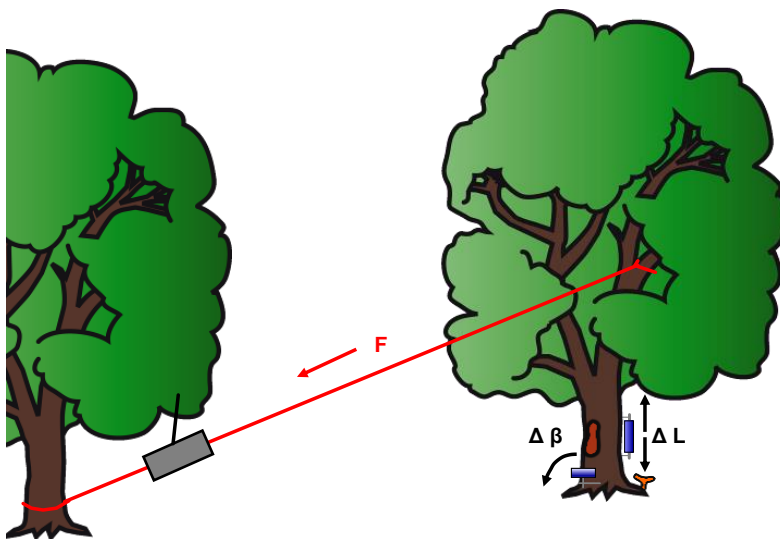


Abb. 2 Aufbau Zugversuch (schematisch)

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.

3 Verankerungskraft des Wurzelsystems

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.

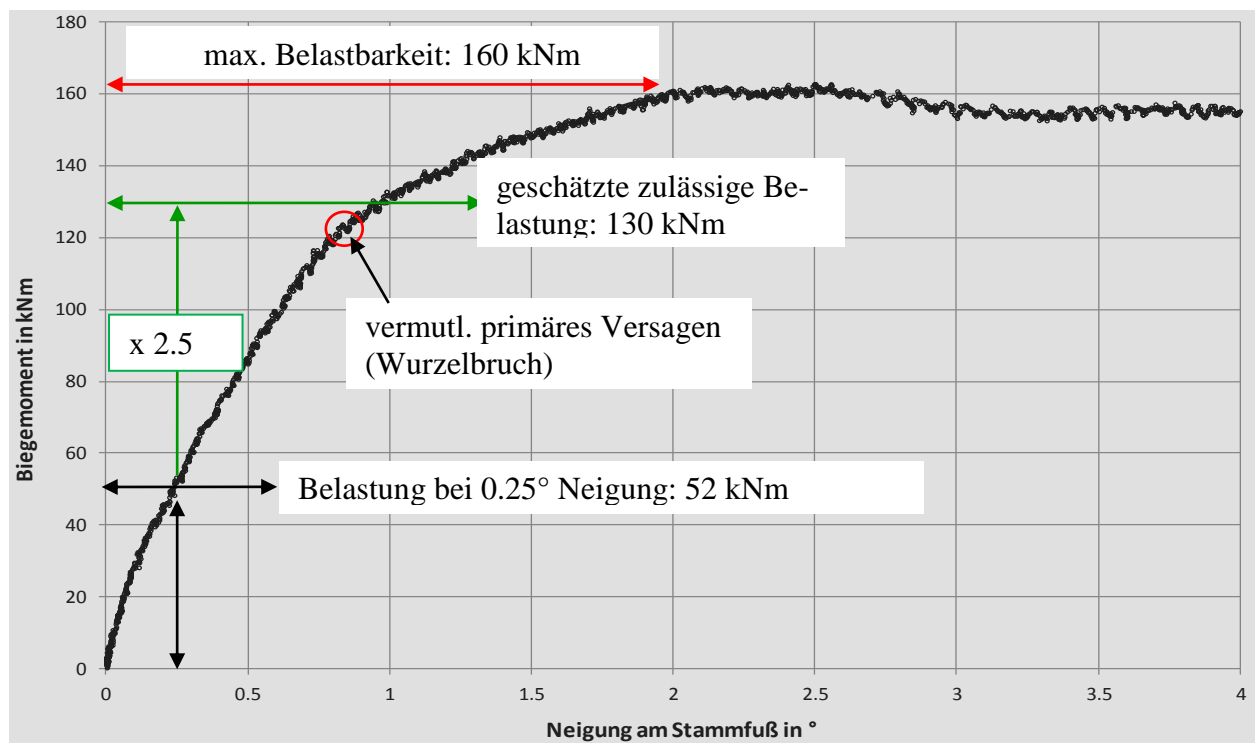


Abb. 3 Kippverlauf für eine Linde mit Brandkrustenpilzbefall (Auszug)

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 Kipp- last abgeschätzt, indem die für eine Neigung von $0,25^\circ$ erforderliche Last unabhängig von Baumart und Boden mit einem festen Faktor hochgerechnet wird (z.B. 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 Kipp- last tritt erst bei höheren Neigungen auf, meist bei etwa 2 bis 5° (Abb. 3).

4 Aktuelle Untersuchungsergebnisse zum Kippverhalten

Die laufenden wissenschaftlichen Untersuchungen sollen zum einen überprüfen, ob die im Zugversuch ermittelten Hilfwerte (Neigung der Wurzelplatte unter Einwirkung einer Biege- belastung) tatsächlich zuverlässige Indikatoren für die Verankerungskraft eines Baumes darstellen. Zum anderen sollen das Kippverhalten der Bäume und der Einfluss von individu- ellen Gegebenheiten bei der Messung untersucht und für eine verbesserte Auswertung der Zugversuche zugänglich gemacht werden.

4.1 Relevanz der Messparameter der Zugversuchsmethode

Die derzeit eingesetzten Verfahren zur Hochrechnung der Messergebnisse aus dem Zugver- such sollen durch Zugversuche an Bäumen, bei denen die Gehölze bis zum Versagen belas- tet werden, auf wissenschaftlicher Basis verifiziert werden. Für die Untersuchungen wurden Zugversuchsinstrumente des Typs TreeQinetic der Fa. argus electronic GmbH, Rostock, ein- gesetzt. Die Hochrechnung der Kippplast 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 Abb. 4 (s. nächste Seite) 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 Kippplast dieser Bäume geeignet ist. Auch wissenschaftliche Untersuchungen an drei Pinien (*Pinus pinea* L.) in Italien haben gezeigt, dass dieses Verfah- ren wertvolle Informationen über die Verankerungskraft 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. Vor 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 und die Gehölze nicht entwur- zelt wurden. Derzeit ist noch nicht geklärt, in welchen Fällen das Biegemoment bei $0,25^\circ$ Stammfußneigung als genereller Indikator der Versagenslast geeignet ist.

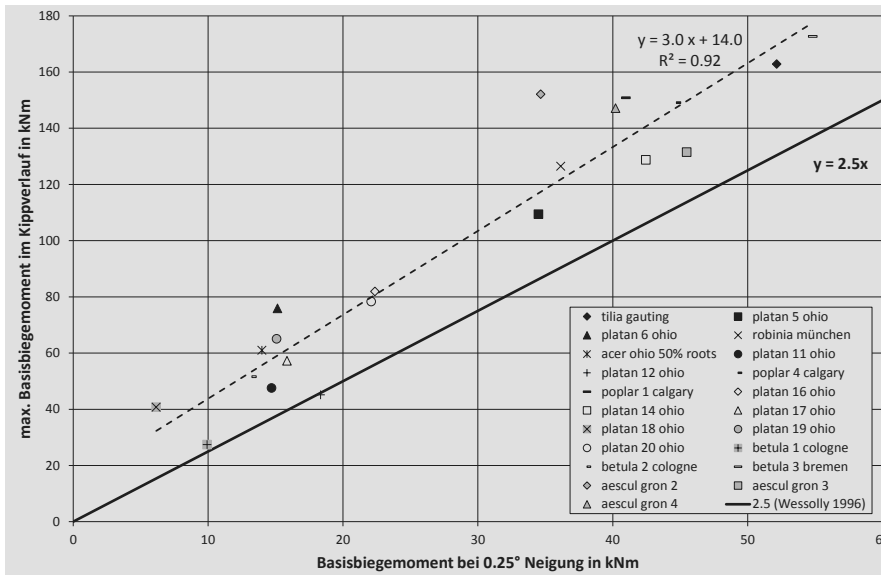


Abb. 4 Hochrechnung der Kipplast aus dem 0,25°-Moment

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).

Auch lassen sich in Abb. 5 (s. nächste Seite) Unterschiede zwischen verschiedenen Baumarten erkennen. 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 über 4,5). Bei Anwendung der bisherigen Berechnungsweise würde dies bedeuten, dass die tatsächliche Sicherheit unterschätzt wird. Der Befund soll nun für Bäume an anderen Standorten und mit anderen Dimensionen überprüft werden. Bei Rot-Fichten (*Picea abies* (L.) H. Karst.) im Bestand zeichnet sich ab, dass die Korrelation sich von anderen

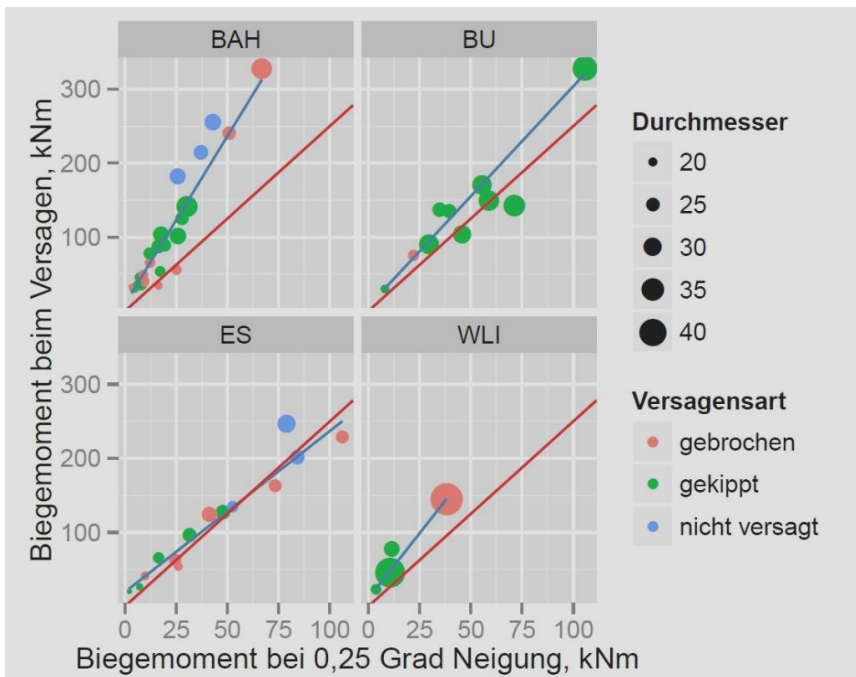


Abb. 5 Relevanz des Messparameters Last bei 0,25° Neigung

baumarten unterscheidet. Die Bäume brachen deutlich unterhalb der Belastung, für die das Kippversagen erwartet wurde (vgl. Abb. 5). Nach Beobachtungen von BADER (2000) könnte dieser Effekt auf arttypische Wurzelverwachsungen zurückzuführen sein, die die Verankerung wie eine hoch belastbare "Wurzelmatte" verstärken.

4.2 Jahreszeitliche Einflüsse auf die Verankerungskraft

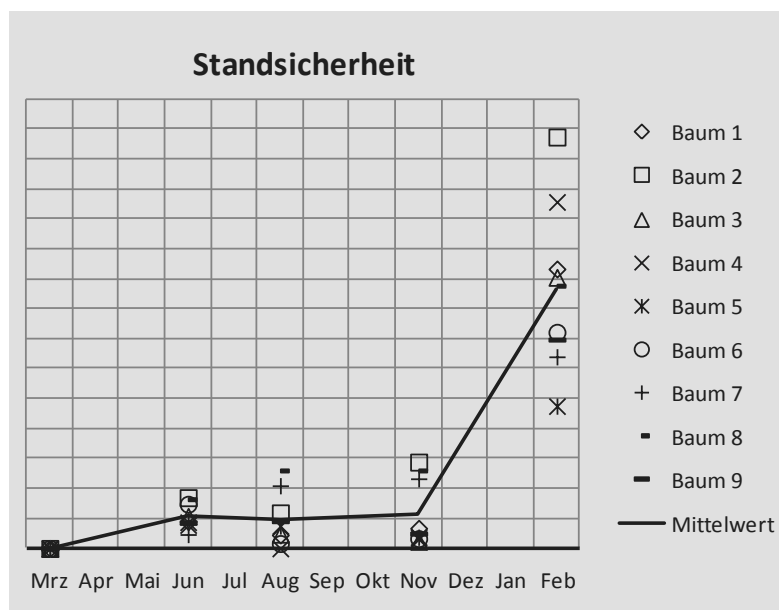
Die Auswirkungen klimatischer Parameter auf das Ergebnis baumstatischer Zugversuche wurden an einer Baumreihe über den Jahresgang aufgezeichnet (MICHAELIS 2012). Als Versuchsbäume wurden 9 Winter-Linden mit Durchmessern zwischen 40 und 60 cm an einem innerstädtischen Standort ausgewählt. Der Standort ist tiefgründig und besteht aus einem Kies-Sand-Gemisch mit weniger als 10% Feinkornanteil. Die Stand- und Bruchsicherheit der Bäume wurde an 5 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 (0). 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 4 Messungen ergab sich hinsichtlich der Standsicherheit eine Abweichung von maximal 30%. Im Mittel über alle Bäume wurden allerdings nicht mehr als 5 bis 10% Unterschied festgestellt. Die Bodentemperatur variierte dabei von 2 bis 22 °C.

Eine viel größere Abweichung ergab sich jedoch aus einer Messung, die im Februar 2012 bei starkem Frost mit Lufttemperaturen um -10 °C, Oberflächentemperaturen des Stammes von -15 °C 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.

In einem anderen Experiment (RUST ET AL 2013) wurde die Steifigkeit der Verankerung von Bäumen mehrfach über einen Winter mit starkem Frost hinweg gemessen. Die Stärke der Verankerung sank, auch oberhalb von 0 °C, mit steigender Bodentemperatur.



Eine längere Frostperiode kann also wichtige Eingangsparameter der Zugversuche signifikant verändern, durch den Frost wurden die rechnerischen Standsicherheitswerte erhöht. 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).

Abb. 6 Standsicherheiten bei Messung an Linden zu verschiedenen Zeitpunkten (Daten aus MICHAELIS 2012)

4.3 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 7 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 Zugversuchen untersucht. Dynamische Versagensvorgänge, wie z.B. ein progressives Versagen der Verankerungswurzeln im Sturm, wurden bislang noch nicht messtechnisch erfasst.

4.4 Modelle für den Kippvorgang

In der Fachliteratur werden verschiedene Modelle für die Mechanik des Kippvorgangs vorgeschlagen und untersucht (z.B. Coutts 1983, Wessolly & Erb 1998, Ennos 2000, Mattheck 2001). In den letzten Jahren wurden rechnerische Modelle entwickelt, mit dem Ziel, die Grundlagen der Bodenmechanik mit Erkenntnissen aus Feldversuchen in Einklang bringen (z.B. Dupuy et al. 2007, Rahardjo et al. 2013). Darüber hinaus wurden Versuche durchgeführt, um die bei Kippen auftretenden Verformungen der Geländeoberfläche und der Randfasern in stammnahen Wurzeln sichtbar zu machen. Diese Arbeiten sind bislang noch nicht allgemein zugänglich.



Abb. 7 Visualisierung von Faserverformungen (The Morton Arboretum, OH)

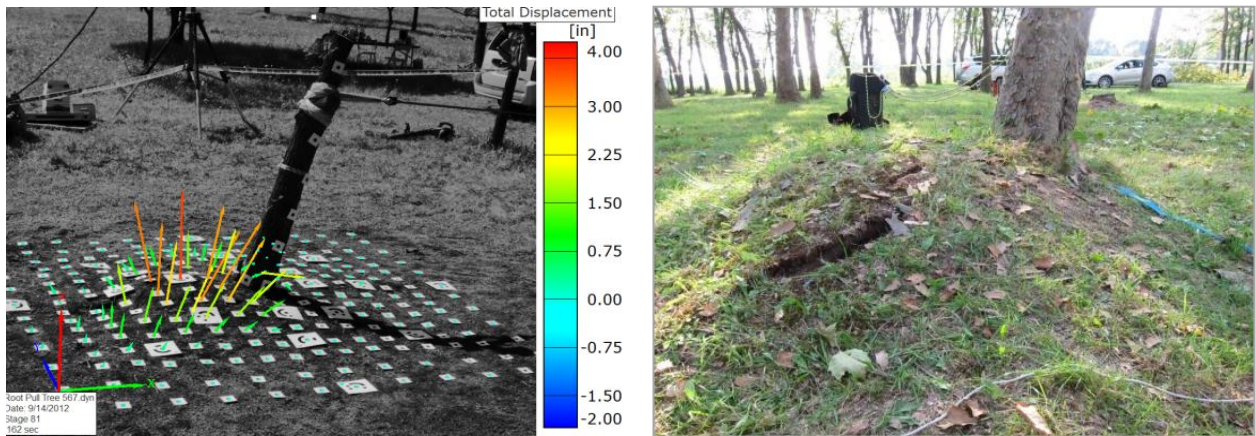


Abb. 8 Verformung der Geländeoberfläche beim Kippen ((links: The Morton Arboretum, OH)

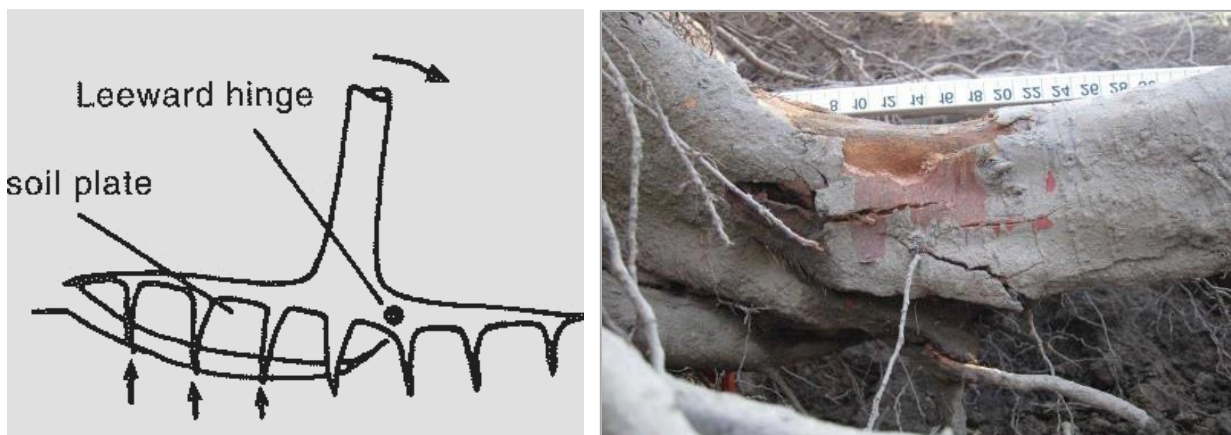


Abb. 9 Stammnaher Wurzelbruch durch Biegung (Schema aus Ennos 2000)

5 Zusammenfassung

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 Bodenart, Wurzelentwicklung, Bodenfeuchte und Temperatur sollten noch eingehender wissenschaftlich untersucht werden, um die Zuverlässigkeit solcher Verfahren zu verbessern.

Literatur

BADER, C. (2000). Untersuchungen über den statisch wirksamen Wurzelraum. Diplomarbeit, Fachhochschule Nürtingen, Landespflege 57 S.

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.

DETTNER, A., BRUDI, E. UND BISCHOFF, F. (2010). Messverfahren und Bewertungsmethoden zur Verkehrssicherheit. *AFZ-Der Wald* (8), 34–35.

DETTNER, A. & RUST, S. (2013). Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.) *Jahrbuch der Baumpflege 2013*, Haymarket Media

- 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.
- ENNOS A.R. (2000): The mechanics of root anchorage. *Advances in Botanical Research*, Volume 33, 2000, Pages 133–157
- FUCHS, CH. (2012). Einfluss der Bodenfeuchte auf das Ergebnis von Standsicherheitsuntersuchungen durch Zugversuche. Bachelorarbeit, HAWK HHG, Arboristik 38 S.
- 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
- JONSSON, M. J. (2007). Energy absorption of trees in a rockfall protection forest. Dissertation. Zürich 222 S.
- KAMIMURA, K., KITAGAWA, K., SAITO, S. UND MIZUNAGA, H. (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. *European Journal of Forest Research* 131.1, 219–227.
- LUNDSTRÖM, T., T. JONAS, V. STÖCKLI, UND W. AMMANN. (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.
- RAHARDJO H., F.R. HARNAS, I.G.B. INDRAWAN, E.C. LEONG, P.Y. TAN, Y.K. FONG, L.F. OW (2013): Understanding the stability of *Samanea saman* trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. *Urban Forestry & Urban Greening* in press
- RUST, S., DETTER, A., FUCHS, CH. UND SCHIRUTSCHKE, B. (2013). Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche. In: D. Dujesiefken, (Hrsg.), *Jahrbuch der Baumpflege 2013*, Haymarket Media, Braunschweig.
- RUST, S. & WEIHS, U. (2007). Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung. In: DUJESIEFKEN, D. & KOCKERBECK, P. (HRSG.). *Jahrbuch der Baumpflege 2007*, 215–241.
- SANI, L., R. LISCI, D. SARRI, M. RIMEDIOTTI, M. VIERI, UND S. TOFANELLI (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, Braunschweig: Thalacker Medien 184 S.
- 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.
- 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.