

Sachgerechter Einsatz von Zugversuchen: Anforderungen an Messverfahren, Auswertungsmethoden und Gutachten

Proper Application of Pulling Tests – Requirements for Measurement Procedures, Evaluation Methods and Expert Reports

von Andreas Detter, Paul Muir, Ludek Praus und Steffen Rust

Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt den aktuellen Stand des Wissens zu baumstatistischen Zugversuchen wieder und fasst Anforderungen an deren sachgerechten Einsatz zusammen. Er basiert auf aktuellen Forschungsarbeiten sowie den langjährigen Erfahrungen der Mitglieder der Sachverständigen-Arbeitsgemeinschaft SAG Baumstatik, die auch in die Erarbeitung der SAG Standards für die Anwendung der Zugversuchsmethode eingeflossen sind. Darin werden technische Leitlinien aufgezeigt, die Sachverständige, Kunden und Vergabestellen nutzen können, wenn sie sich an den Anforderungen der SAG Baumstatik an eine sachgerechte Vorgehensweise bei der Zugversuchsmethode orientieren wollen.

Summary

This article reflects the current state of knowledge on Static Load Tests (also known as the Pulling Test Method or SIM) currently used in arboriculture and summarizes the requirements for their proper use. It is based on findings from recent research as well as on the many years of experience of the members of the tree consultants working group SAG Baumstatik, which have been incorporated in the development of the SAG Standards for the Static Load Test Method. It outlines technical guidelines that can be used by consultants, clients and contracting authorities if they want to orientate themselves on the technical requirements of the SAG Baumstatik for a proper procedure in the Static Load Test Method.

1 Einleitung

Für den sachgerechten Einsatz der Zugversuchsmethode können deren langjährige Anwender zwar in den meisten Fällen auf ausreichende Erfahrungswerte zurückgreifen. Gerade in einem wachsenden Markt von Anbietern stehen diese jedoch nicht unbedingt allen zur Verfügung. Aus diesem Grund scheint es dringend geboten, technische Standards und Richtlinien für die Anwendung der Zugversuchsmethode zu definieren.

Die Sachverständigen-Arbeitsgemeinschaft (SAG) Baumstatik e. V. ist ein internationaler Zusammenschluss von Baum-Sachverständigen und besteht seit nahezu 30 Jahren. Ihr Ziel und Bestreben ist es, eine Plattform für den Austausch von Wissen anzubieten

und Kenntnisse über Bäume zu vertiefen. Besonderen Stellenwert hat dabei die Bewertung ihrer Sicherheit nach ingenieurtechnischen Grundsätzen. Die SAG Baumstatik beschäftigt sich mit baumschonenden Untersuchungsverfahren und nachvollziehbaren Methoden, die der komplexen Frage der Verkehrssicherheit gerecht werden (www.sag-baumstatik.org). Dafür wird die Fachdiskussion mit Vertretern aller relevanten Fachdisziplinen gesucht, um neue Erkenntnisse in etablierte Methoden zu integrieren und diese kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Fehlerhaft durchgeführte Zugversuche können zu erheblichen Schäden am untersuchten Baum führen und die Sicherheit in seinem Umfeld gefährden, und zwar sowohl beim Zugversuch selbst als auch bei

zukünftigen Sturmereignissen. Gerade für öffentliche Auftraggeber ist es schwierig, aus einer stetig wachsenden Anzahl von Sachverständigen, die Zugversuche zu unterschiedlichsten Preisen anbieten, zuverlässige Bieter auszuwählen oder Qualitätsmängel zu erkennen. Aus diesem Grund haben die Mitglieder der SAG Baumstatik, wissenschaftlich begleitet, technische Richtlinien und sinnvolle Ausschreibungstexte für Zugversuche erarbeitet und stellen diese der Fachwelt zur Verfügung. Die SAG Standards werden im Laufe des Jahres 2022 erscheinen und sollen hier vorab umrissen werden.

2 Die Zugversuchsmethode

2.1 Grundlagen

Baumstatische Zugversuche, teils auch als „Zugverfahren“ bezeichnet, werden seit über 30 Jahren als zerstörungsfreie Methode der eingehenden Untersuchung von Bäumen verwendet und kamen bis heute weltweit

an Zehntausenden von Bäumen zum Einsatz (WESSOLLY 2010), um deren Belastbarkeit, Stand- und Bruchsicherheit abzuschätzen. Auf diese Weise konnten zahlreiche wertvolle Alt- und Habitatbäume trotz erheblicher Schäden in ihrer vollen Größe erhalten werden, obwohl andere Untersuchungen oft zu gegensätzlichen Einschätzungen gekommen waren. Auf diese Weise können sie ihre wichtigen ökologischen und kulturellen Funktionen weiterhin erfüllen (vgl. Abbildung 1).

Die Grundlagen dieser etablierten Methode wurden jedoch nur durch wenige Artikel in wissenschaftlichen Journals beschrieben (SINN & WESSOLLY 1989; WESSOLLY 1991) und erst in jüngerer Zeit durch begutachtete Forschungsarbeiten überprüft (z. B. SANI et al. 2012; KANE 2014; DETTER et al. 2019c; RUST & DETTER 2019; KRISĀNS et al. 2022). Sie findet aber bereits seit Jahren in der wissenschaftlichen Praxis Verwendung, um die Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen zu untersuchen (vgl. SMILEY 2008; KRISĀNS et al. 2020a, b, c). Für den Einsatz der Zugversuchsmethode sind spezielle



Abbildung 1: Zwei Beispiele für wertvolle Altbäume, die mithilfe der Zugversuchsmethode erhalten werden konnten: Kaspars-Eiche in Hetzles (links) und Königslinde im Schloss Linderhof.

Kenntnisse erforderlich, die sich auf die Biomechanik der Bäume, die Einwirkungen des Windes auf Baumkronen und die Beurteilung von Messergebnissen erstrecken. Sie gehen über das Standardwissen im Bereich eingehender Untersuchungen deutlich hinaus. Bislang liegen, ebenso wie bei anderen Verfahren der Baumuntersuchung, noch keine allgemeinen Leitlinien zur sachgerechten Anwendung der Methode vor.

2.2 Methodische Vorgehensweise

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 genau dosierte statische Ersatzlasten

Windlastanalyse: Abschätzung der am Standort zu erwartenden Windbelastung

Extrapolation: Hochrechnung der Lasten aus dem zerstörungsfreien Bereich auf kritische Grenzwerte für die Belastbarkeit von Stamm und Verankerungswurzeln

Auswertung: Ermittlung der Stand- und Bruchsicherheit durch Vergleich der extrapolierten Mindest-Tragfähigkeit mit der im Sturm zu erwartenden Windlast

Der Zweck des eigentlichen Zugversuchs am Baum ist es zunächst, die Reaktion des Baumes auf eine Biegebelastung möglichst exakt zu erfassen. Das Ziel der gesamten Untersuchungsmethode ist jedoch die Bestimmung der Sicherheit gegen ein Versagen im Sturm. Der Zugversuch ist also nicht nur ein Messverfahren, das auf die mechanischen Eigenschaften des Baumes abzielt. Baumstatische Zugversuche beinhalten weitere systematische Auswertungsschritte, um vom Ergebnis der zerstörungsfreien Messung am Baum zu einer Bewertung der Stand- und Bruchsicherheit zu kommen. Wie bei allen anderen Untersuchungsmethoden erfolgt dies mithilfe spezifischer Analysen, vereinfachender Abschätzungen und allgemeiner Richtwerte (vgl. DETTER et al. 2010). Damit unvermeidliche Unsicherheiten nicht zu einer falschen Einschätzung der Versagensgefahr führen, zielen die Bewertungen auf den ungünstigsten noch zu erwartenden Fall und werden mit Sicherheitsbeiwerten beaufschlagt.

Die ermittelten Messwerte beziehen sich unmittelbar auf Reaktionen des Baumes, die bei Sturm einwirkung auch zum Versagen führen könnten: die Stauchung der Randfasern des Stammes und die Neigung der Wurzelplatte unter Last. Sie sind daher besonders gut geeignet, die Belastbarkeit des Baumes abzubilden (vgl. 3.4.1). Damit die Aussagekraft des Messverfahrens gewährleistet ist, müssen Sachverständige jedoch in der Lage sein, einen Zugversuch so durchzuführen, dass die Messergebnisse auch tatsächlich die tragende Struktur des Baumes repräsentieren.

Um die Stand- und Bruchsicherheit des Baumes zu ermitteln, müssen zusätzlich noch die zu erwartenden Windlasten abgeschätzt werden. Da eine Messung der Windeinwirkung ad hoc nicht möglich ist, kommen etablierte ingenieurtechnische Schätzverfahren zum Einsatz, die für Bäume in Teilen modifiziert werden mussten. Die Anwendung solcher Windmodelle fällt eigentlich nicht in den Fachbereich Baumpflege, sondern erfordert Kenntnisse der Aerodynamik von Strukturen, insbesondere im bebauten Umfeld. Die Unwägbarkeiten eines solchen rechnerischen Ansatzes müssen dabei angemessen berücksichtigt werden. Grundsätzlich sind Windlastanalysen, die auf den einschlägigen Normen basieren und für Bäume modifiziert wurden, aber für die Auswertung von Zugversuchen zuverlässig einsetzbar (vgl. 3.3.1).

2.3 Der Zugversuch

Beim Zugverfahren wirken Zugkräfte über ein in der Krone befestigtes Seil auf den Baum ein (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 durch hochauflösende Messgeräte erfasst werden können. Hierzu werden ein elektronischer Kraftmesser und spezielle Dehnungs- bzw. Neigungssensoren eingesetzt. Kontinuierlich und jeweils zeitgleich werden beim Zugverfahren drei Arten von Messwerten aufgezeichnet (typische Bezeichnungen für die Messgeräte in Klammern):

- die auf den Baum einwirkende Kraft (Forcemeter, Dynamometer, Kraftmessdose),
- die Dehnung bzw. Stauchung der Randfasern im

Stamm (Elastometer, Dilatometer, Setz-/Dehnungsgeber),

- die Neigung der Wurzelplatte (Inclinometer, Neigungsgeber).

Darüber hinaus müssen für die Auswertung noch zahlreiche andere Daten erfasst werden, darunter u. a. die Baumhöhe, die Höhe des Ankerpunktes im Baum, der Seilwinkel und der Stammdurchmesser. Jeder Zugversuch wird konstant überwacht und bei vergleichsweise geringen Reaktionen des Baumes beendet, sobald bestimmte Schwellenwerte erreicht sind. Diese müssen nachweislich im elastischen Bereich liegen, sodass alle entstandenen Verformungen reversibel sind und ausreichende Sicherheitsabstände zum Beginn von Versagensprozessen eingehalten werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass der untersuchte Baum nicht beschädigt wird.

2.4 Auswertungsmethoden

Für die Auswertung der Zugversuche werden derzeit mehrere Methoden angeboten, deren Vorgehensweise zumeist sehr ähnlich ist. Sie alle rechnen die Baumreaktion aus dem zerstörungsfreien Bereich auf Versagensgrenzen hoch und schätzen die Sicherheit anhand einer Windlastanalyse ab. Damit folgen sie der grundlegenden Vorgehensweise, die am Sonderforschungsbereich 230 „Natürliche Konstruktionen“ der Universität Stuttgart Mitte der 80er Jahre entwickelt wurde, wo sich zahlreiche Forscher mit der Übertragung ingenieurtechnischer Ansätze auf Bäume beschäftigten (FOBO 1986; KULL & HERBIG 1988; WESSOLLY 1988).

Heute geben vor allem die aktuellen Fachbücher der damals maßgeblichen Hauptakteure über die Ergebnisse dieser Arbeit und die weitere Entwicklung der Baumstatik Auskunft (SINN 2003; WESSOLLY & ERB 2014; SINN 2022). Durch Forschungsarbeiten zur Biomechanik der Bäume aus der Forstwissenschaft, inzwischen aber zunehmend auch aus der Baumpflege selbst, wurden die Erkenntnisse in diesem Bereich in den letzten 30 Jahren enorm weiterentwickelt. Einen Überblick bieten z. B. zwei Literaturrecherchen, die von der International Society of Arboriculture (ISA) beauftragt und finanziert wurden (JAMES et al. 2014; DAHLE et al. 2017).

3 Die SAG Standards für Zugversuche

Die neuen Richtlinien der SAG Baumstatik sind derzeit noch in Bearbeitung und werden hier in ihren Grundzügen vorgestellt. Nach ihrer Fertigstellung werden sie in Kürze auf der Website der SAG Baumstatik (www.sag-baumstatik.org) abrufbar sein. Die Darstellung in diesem Beitrag folgt dem Aufbau der SAG Standards, die fünf Themengebiete behandeln:

- die erforderliche Qualifikation der Anwender,
- die Durchführung der Messungen im Zugversuch,
- die Windlastabschätzung nach ingenieurtechnischen Standards,
- die Auswertung der Daten zur Bestimmung von Sicherheitsfaktoren und
- die Darstellung der Vorgehensweise, Parameter und Ergebnisse in einem Gutachten.

3.1 Die Qualifikation der Anwender

Bei einer Methode, die an zahlreichen Stellen qualifizierte Einschätzungen, erfahrungsbasierte Entscheidungen und umfangreiches Hintergrundwissen erfordert, wird die Qualität und Belastbarkeit der Ergebnisse unvermeidlich von der Person des oder der Ausführenden beeinflusst. Aus genau diesem Grund wird sie nur von Sachverständigen angewendet. Auf deren Urteil dürfen sich Kunden eher verlassen als auf das weniger erfahrener Fachleute oder gar von Laien. Dazu müssen Sachverständige über besondere Sachkunde und umfassendes Spezialwissen verfügen. Dies gilt umso mehr, je weitreichendere Folgen Fehleinschätzungen haben könnten.

In Deutschland stehen öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige zur Verfügung, die ihre besondere Sachkunde nachweisen müssen. Natürlich können aber auch nicht öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige die Zugversuchsmethode sachgerecht anwenden. Die öffentliche Bestellung ist auch keineswegs ein hinreichendes Kriterium, denn die Bestellung erfolgt für ein ganzes Sachgebiet und nicht für besondere Teilbereiche wie die angewandte Baumstatik. Vielmehr sind die persönlichen Voraussetzungen und fachlichen Grundkenntnisse, die Sachverständige für ihre Arbeit mitbringen, sowie die spezifische Ausbildung und Erfahrung in der Anwendung der Methode

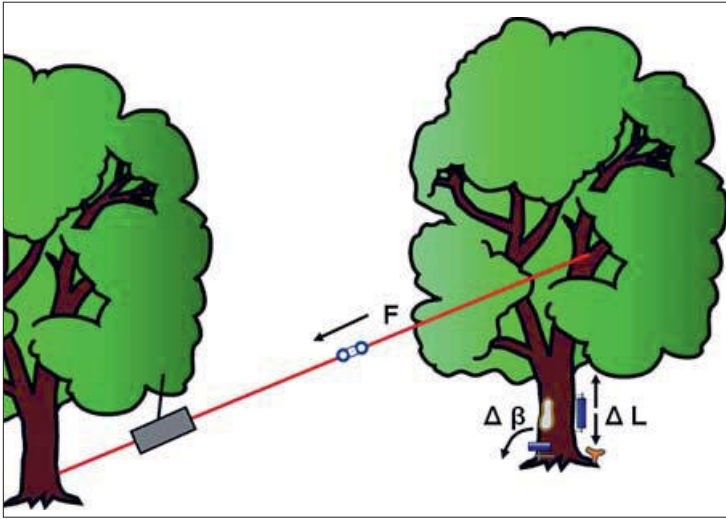


Abbildung 2:
Schematischer Aufbau eines Zugversuchs (von links nach rechts):
Zuggerät (z. B. Hebezug),
Zugseil mit Forcemeter zur Kraftmessung (F),
Inclinometer zur Messung der Neigungsänderung am Stammfuß ($\Delta\beta$) und
Elastometer zur Messung der Faserdehnung (ΔL)

für ihre Eignung von entscheidender Bedeutung. Leider können solche „weichen“ Kriterien weder durch Zertifikate noch durch bestimmte Merkmale abgeprüft werden. Im Folgenden sollen beispielhaft einige Punkte genannt werden, die die SAG Standards bezüglich der erforderlichen Qualifikation der Anwender anführen. Diese sollten folgende Kenntnisse und Fähigkeiten besitzen:

- Zuverlässige visuelle Beurteilung der Verkehrssicherheit von Bäumen anhand von Auffälligkeiten, Defektsymptomen und Kompensationswachstum
- Umfassende Kenntnis der biomechanischen Grundlagen der Tragfähigkeit von Bäumen, ihrer Belastung durch äußere mechanische Einwirkungen wie Starkwindereignisse und der Prozesse, die zu ihrem Versagen führen können
- Grundlegendes Verständnis für ingenieurtechnische Herangehensweisen bei der Beurteilung der Sicherheit von Strukturen
- Anwendung spezifischer Sicherheitsregeln bei Zugversuchen unter Einsatz großer Kräfte, oft in der Nähe belebter Verkehrsbereiche
- Beurteilung von Daten und Ergebnissen einschließlich Fehleranalysen und Plausibilitätskontrollen
- Vermittlung komplexer Inhalte in Gutachten, sowohl mündlich als auch in schriftlicher Form
- Erfahrung mit der Pflege von Altbäumen und baumpflegerischen Sicherungsmaßnahmen zur Herstellung der Verkehrssicherheit

Diese Eigenschaften können durch langjährige Erfahrung ebenso erworben werden wie durch eine angemessene Schulung und Anleitung. Dabei kommt es nicht nur auf die Dauer der Schulung oder der Arbeit mit Bäumen an, sondern auf deren Art und Inhalt. Als Mindestdauer einer angemessenen Grundausbildung in Theorie und Praxis kann nach den Erfahrungen mit zahlreichen Lehrgängen eine Dauer von fünf Unterrichtstagen angesehen werden, aber nur wenn die Teilnehmer bereits über entsprechende Vorkenntnisse in Baumpflege und Baumuntersuchung, Baumbiologie und Schadenskunde von Bäumen, gutachterlicher Arbeit sowie in den Grundlagen der Biomechanik, Bodenkunde und Meteorologie verfügen. Unerlässlich ist danach aber eine regelmäßige Weiterbildung, um das vermittelte Wissen aufzufrischen und aktuelle Entwicklungen und Erkenntnisse in die Arbeitspraxis übersetzen zu können.

3.2 Die Messung im Zugversuch

3.2.1 Allgemeine Sicherheitsaspekte

Beim Zugverfahren muss die statische Belastung des Baumes messtechnisch überwacht und auf den Bereich unschädlicher Reaktionen begrenzt werden. Wird ein Zugversuch über den zerstörungsfreien Bereich hinaus fortgesetzt, kann der untersuchte Baum abbrechen oder

entwurzelt werden. Bei größeren Bäumen müssen zudem teils enorme Kräfte aufgebracht werden, um eine verwertbare Reaktion des Baumes zu erzielen. Daher spielen Sicherheitsüberlegungen, anders als bei anderen Untersuchungsverfahren, eine bedeutende Rolle.

Im Grunde wird für die Messung am Baum eine Seilzug-Maschine gebaut. Beim Betrieb eines solchen Apparates gelten analog die Grundsätze und Vorgaben der Richtlinie 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie), die in Deutschland in Form der sog. Maschinenverordnung (9. ProdSV) umgesetzt wurde. Unter anderem ergeben sich daraus Anforderungen an die Qualität der verwendeten Bauteile (z. B. CE-Prüfung) und deren zulässige Konfiguration, bei der durchgängig die freigegebenen Arbeitslasten oder die Bruchlasten mit entsprechenden Sicherheitsabschlägen zu beachten sind. Gerade wenn Zugversuche in öffentlichen Bereichen, v. a. im Aufenthaltsbereich von Personen, an Straßen oder gar neben Bahnanlagen durchgeführt werden, müssen solche Vorgaben unbedingt beachtet werden. Hier stünde bei einem fahrlässig, also z. B. durch Missachtung einschlägiger Vorschriften verursachten Sachschaden immer auch der strafrechtliche Vorwurf des gefährlichen Eingriffs in den Schienenverkehr im Raum (§ 315 StGB). Völlig inakzeptabel ist es in dieser Hinsicht, wenn Zugversuche, wie aus der Praxis berichtet, ohne Absperrung des Gefahrenbereichs, beispielsweise auf einem belebten Schulhof oder über befahrene Verkehrsflächen hinweg, durchgeführt werden. Solche Arbeiten werden den Anforderungen an die Unfallverhütung nicht gerecht.

Als ein immer wieder vorkommendes Beispiel für die fehlerhafte Konfiguration von Bauteilen im Zugsystem sei hier die falsche Einbindung von Karabinern in mehr als zwei Lasteinleitungspunkte genannt. Auch wenn es sich um Schwerlastkarabiner mit zertifizierter Bruchlast handelt, dürfen sie nur in gerader Linie, beispielsweise zwischen zwei Seilen, entlang ihrer Längsachse eingesetzt werden. Sollen z. B. die beiden Enden einer Schwerlastschlinge mit dem Zugseil verbunden werden (drei Anschlagpunkte), muss zwingend ein Stahlschäkel verwendet werden. Karabiner können in einer solchen Konfiguration weit unterhalb ihrer zulässigen Arbeitslast versagen, wobei rasiermesserscharfe Bruchstücke als tödliche Geschosse Dutzende Meter weit geschleudert werden.

3.2.2 Messaufbau

Wie bei allen Messungen entscheidet der Aufbau wesentlich darüber, ob das Ergebnis verwertbar ist. Die Untersuchung zielt darauf, die Tragfähigkeit des Baumes im Hinblick auf die ungünstigsten zu erwartenden Einwirkungen zu überprüfen. Daher müssen Anwender zunächst untersuchen, aus welcher Richtung bei den in dieser Region üblichen Starkwindereignissen mit den größten Einwirkungen zu rechnen wäre, auch angesichts möglicher Abschirmung durch Nachbarbäume oder andere Strukturen. Außerdem ist entscheidend, welche Lastrichtung aufgrund der vorhandenen Schäden am Baum die ungünstigste wäre. Würde z. B. der Wurzelbereich einer straßenbegleitenden Baumreihe entlang des Straßenverlauf abgegraben, müssen die Zugversuche senkrecht zur Straße durchgeführt werden (Abbildung 3). Dies ist ungleich aufwendiger als die Bäume parallel zur Straße zu untersuchen, wo ausreichend Bäume als Widerlager vorhanden sind und der Verkehr nicht vollständig gesperrt werden muss. Das Ergebnis wäre aber unbrauchbar, denn die Schwächung der Verankerungskraft durch die Abgrabung wird in dieser Lastrichtung nicht vollständig erfasst, sodass eine konkrete Umsturzgefahr eventuell nicht entdeckt würde.

Auch hinsichtlich der Anordnung der Messgeräte am Baum sind zahlreiche Details zu beachten. Die Messgeräte werden immer Daten aufzeichnen, für die Auswertung kommt es aber letztlich darauf an, ob diese Daten tatsächlich auch repräsentativ für die Reaktion des Baumes sind. An den Datensätzen lässt sich das meist nicht erkennen, auch wenn Kontrollwerte oft gute Hinweise auf Fehler liefern können. Nur indem der Messaufbau schriftlich und mit zahlreichen Fotos dokumentiert wird, können Fehlmessungen und Artefakte bei der Prüfung der Messergebnisse erkannt und bei der Auswertung ausgeschlossen werden. So dürfen Dehnungssensoren beispielsweise nur faserparallel angebracht werden und keine Bereiche überspannen, in denen der Faserverlauf gestört ist (Abbildung 4). Typische Fehlmessungen entstehen beispielsweise, wenn die Fasern im Bereich eines Wurzelanlaufs konkav, also nach innen gekrümmt sind. Durch sog. dehnungslose Verformung (L. WESSOLLY, pers. Mitt. 2002) entstehen deutlich überhöhte Messwerte, die nicht das Verhalten der Fasern abbilden. Indem sich die Krüm-



Abbildung 3: Straßenparallele Abgrabung: Zugversuche müssen senkrecht zum Grabenverlauf durchgeführt werden, auch wenn dies ungleich aufwendiger ist als parallel zur Grabung (Foto: M. ADAMEK, München).

mung unter Biegelast unmerklich schließt oder öffnet, verändert sich der Abstand zwischen den Messstiften des schräg ansitzenden Elastometers, ohne dass die Randfasern entsprechend gedehnt oder gestaucht werden.

Noch drastischer sind Messfehler, wenn der Faserverlauf unterbrochen ist, beispielsweise durch Rindeneinschlüsse in Veredelungsstellen (Abbildung 5 oben). Hier können enorm überhöhte Dehnungswerte auftreten, wenn erst weiter innen im Querschnitt wieder fest verwachsene Fasern vorhanden sind und sich die Rindenfalte unter Biegelast öffnet. In einem anderen Fall führte ein ähnlicher Fehler zu der vorschnellen Empfehlung, den Baum innerhalb weniger Tage zu fällen. Der Dehnungsmesser war am Stammfuß platziert worden, steckte aber, vom Sachverständigen offenbar un bemerkt, mit einer Messnadel in einer umschlingenden Wurzel (Abbildung 5 unten). Da diese nicht fest verwachsen war, konnte sie sich im Zugversuch gegenüber dem Holzkörper des Stammes verschieben. Am Elastometer traten daher sehr viel höhere Dehnungs-



Abb. 4: Die Messung ohne dehnungslose Verformung ist nur ober- u. unterhalb des abknickenden Faserverlaufs möglich. Im gekrümmten Bereich zwischen den abgebildeten Elastometern werden um ca. 15-20 % überhöhte Messwerte aufgezeichnet.

werte auf als an allen anderen Messstellen. Den Fehler hätte ein geschulter Anwender bereits bei der Anbringung des Gerätes oder bei der Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse vor Ort, spätestens jedoch bei der Auswertung anhand der Kontrollwerte (Reststeifigkeit und theoretisch abgeleiteter Höhlungsgrad, vgl. 3.4.2) erkannt.

Bei der Neigungsmessung können Messfehler vor allem dadurch entstehen, dass der Sensor nicht an der richtigen Stelle angebracht wird oder aufgrund seiner Bauart angebracht werden kann. Denn es ist entscheidend, die Neigungssensoren nahe an der Stammachse und dennoch so niedrig wie möglich anzubringen (Abbildung 6). Ansonsten fließen leichte Rotationen der stammnahen Wurzeln bzw. die Durchbiegung des Stammes als scheinbare Neigungsänderung in das Messergebnis ein. Gerade bei geringem Stammdurchmesser können erhebliche Fehler auftreten, aber auch wenn bei Bäumen mit breitem Stammfuß insgesamt nur geringe Neigungswerte erzielt werden. In zahlreichen Zugversuchen von DETTER, WASSENAER und RUST



Abbildung 5: Rindeneinschlüsse verfälschen die Messung: oben an einer Veredelungsstelle, ...



Abbildung 6: Inclinometer müssen so tief wie möglich am Stammfuß angebracht werden, sollten aber möglichst nicht auf Wurzeln platziert sein.



... unten an einer Würge wurzel (Elastometer Nr. 9, Bilder nachgestellt).

2019 an 90 Bäumen zeigte sich zudem, dass in seitlicher Position zur Lastrichtung in etwa 90 % der Fälle größere Neigungswerte erreicht werden als auf der Last zu- oder abgewandten Seite (unveröff. Daten, Publikation in Vorbereitung).

Die falsche Anbringung der Sensoren ist eine der größten Fehlerquellen im Messaufbau. Aber auch wenn an einem komplizierten Baum deutlich zu wenige Messstellen überprüft werden, kann das Ergebnis falsch oder nicht belastbar genug sein. Hinzu kommen gegebenenfalls Fehlerquellen durch technische Schwächen der Geräte selbst, wie zu geringe Auflösung, fehlende Genauigkeit, Übertragungsprobleme mechanischer und funkttechnischer Natur oder ungeeignete Überwachungssoftware.

Werden die sehr geringen Reaktionen des Baumes auf die eingeleitete Last nicht sicher und ohne Verzögerung erfasst, ist eine zuverlässige Auswertung der Daten ebenso wenig möglich wie eine sichere Überwachung des Zugversuchs. Denn im Laufe der Untersuchung muss stets sichergestellt werden, dass die Grenzen der zerstörungsfreien Verformung des Baumes nicht überschritten werden.

3.2.3 Voraussetzungen einer zerstörungsfreien Messung

In verschiedenen Untersuchungen wurde festgestellt, dass bis zu einer Neigung der Stammbasis von $0,5^\circ$ keine Schäden an Wurzeln auftreten (z. B. COUTTS 1983; MARCHI et al. 2019). Geringfügige Restneigungen von zwei bis drei Hundertstel Grad können nach einem Zugversuch zwar zunächst verbleiben, stellen sich aber durch

viskoelastische Effekte und leichte Windböen innerhalb kurzer Zeit wieder zurück (JAMES et al. 2013; KUEBART 2016). Erreicht man im Zugversuch aber Neigungen von 0,7 bis 0,8° oder überschreitet sogar 1° Neigung, entstehen in aller Regel Schäden im Wurzelsystem (u. a. SINN 1990; JONSSON 2007; LUNDSTRÖM et al. 2007), die den Baum erheblich beeinträchtigen und später sogar zum Kippversagen führen können. Eine solche massive Überlastung im Zugversuch wurde beispielsweise in einem Gutachten dokumentiert, in dem der vermutlich unerfahrene Anwender den Baum trotz der Beschädigung als ausreichend standsicher einstuft. Bei weiteren unsachgemäßen Zugversuchen kippte er sogar einen Habitatbaum des streng geschützten Eremiten (*Osmoderma eremita*) im Rahmen der Untersuchung so stark an, dass dieser anschließend gefällt werden musste. Bei einer sachgemäßen Anwendung des Zugverfahrens sind solche Schäden zwar ausgeschlossen, dennoch können Ereignisse wie diese fatale Auswirkungen auf die Arbeit aller, auch der seriösen Sachverständigen haben.

Im Zugversuch werden immer die schwächsten Stellen des Stammes überwacht und die Messungen weit vor Erreichen ihrer Tragfähigkeitsgrenzen beendet. Dabei ist es oft erforderlich, zu Überwachungszwecken auch an dem Stämmeling einen Sensor anzubringen, an dem die Last eingeleitet wird. Durch die korrekte Anordnung der Messgeräte muss gewährleistet sein, dass die Randfasern, die sich unter Biegelast am stärksten verformen, messtechnisch erfasst werden. Gabelungen, die durch Rissbildung versagen könnten und sich daher mit Dehnungsmessern nicht ausreichend überwachen lassen, dürfen nicht auf Zug, sondern nur auf Druck belastet werden.

Solche Vorkehrungen und die Einhaltung definierter Grenzwerte, die aus den langjährigen Erfahrungen der Anwender abgeleitet wurden, können eine Überlastung, eine Rissbildung oder gar ein Bruchversagen während der Zugprüfung zuverlässig verhindern.

3.2.4 Zusammenfassung der Anforderungen an die Messungen

Die Auflistung möglicher Fehler ließe sich weiter fortsetzen. Sie verdeutlicht aber bereits in dieser Form, dass es nicht zweckmäßig wäre, Messgeräte für Zugversuche ohne eine adäquate Ausbildung einzusetzen,

da dies zu unbrauchbaren Ergebnissen oder aber, schlimmer noch, zu erheblichen Gefährdungen sowohl der Ausführenden als auch unbeteiligter Dritter führen kann. Qualitativ hochwertige Schulungen zukünftiger Anwender, in denen die Anforderungen ausführlich vermittelt werden, können und müssen dies verhindern. Folgeschwere Fehler könnten mit wachsendem Anwenderkreis ansonsten diese etablierte Methode zu Unrecht in Verruf bringen.

Die wichtigsten Aspekte einer sachgerechten Messung im Zugversuch lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen:

- Auswahl der Lastrichtung unter Berücksichtigung von Schäden hinsichtlich der Tragfähigkeit des Baumes und der stärksten Windeinwirkung
- ausreichend belastbarer Ankerpunkt im Baum mit genügend langem Hebelarm, reibungsfreier Seilverlauf, Beachtung von Kronensicherungssystemen
- gut dimensioniertes Widerlager mit überprüfbarer Haltekraft
- Verwendung und korrekte Konfiguration der Bauteile des Zugapparates, Sicherung des Verkehrs und Beachtung der Vorgaben der Unfallverhütung
- Einsatz geeigneter Sensoren bezüglich Anbringung, Messbereich und Messgenauigkeit
- Positionierung der Sensoren so, dass sie unbeeinflusste Messdaten aufzeichnen, nur repräsentative Verformungen erfassen und die schwächsten Bereiche abdecken
- Ausschluss einer Überlastung des Baumes durch zuverlässige Überwachung und Beachtung von Schwellenwerten
- Aufzeichnung von ausreichend großen, aber voll reversiblen Verformungen, um eine zuverlässige Auswertung zu ermöglichen
- Plausibilitätskontrolle der gemessenen Baumdaten und der erzielten Baumreaktion

3.3 Die Abschätzung der Windlast

Die Windbelastung von Bäumen kann derzeit nur abgeschätzt werden, da es noch keine praxistauglichen Verfahren gibt, mit denen sie sich unmittelbar messen ließe. Baumreaktionen, die während relativ schwacher Windereignisse erfasst wurden, können nur einge-

schränkt hochgerechnet werden (GÖCKE & RUST 2015). Daher sind noch immer Schätzverfahren erforderlich, um die Belastung des Baumes während eines starken Sturmereignisses zu simulieren. Im Hochbau und Ingenieurwesen wurden hierfür seit den 1960er Jahren weltweit etablierte Methoden und Richtlinien entwickelt (z. B. DAVENPORT 1960), die mit Vorgehensweisen in unterschiedlichem Detaillierungsgrad zu sinnvollen Ergebnissen führen. Sie wurden bei der Entwicklung der Baumstatik auf die lebende Struktur Baum übertragen (u. a. WESSOLLY 1989a; SINN et al. 1992), entsprechend angepasst und während der Weiterentwicklung der Zugversuchsmethode in den letzten 15 Jahren nochmals verfeinert.

3.3.1 Geeignete Verfahren

Bäume sind schwingungswillige und unregelmäßig geformte Strukturen. Damit ist nach den Vorgaben des Eurocode (DIN EN 1991–1–4) die Verwendung des vereinfachten Verfahrens nicht zulässig, das nur mit der windexponierten Fläche und einem pauschalen Böendruckwert arbeitet. Dies führt zu falschen Ergebnissen, wie das einfache Beispiel mit asymmetrischen Kronen gleicher Fläche, aber unterschiedlicher Ausrichtung in Abbildung 7 und 8 zeigt. In solchen Fällen muss das komplexere Verfahren zur Windlastabschätzung herangezogen werden, das die Verteilung der Windeinzugsfläche über die Baumhöhe, die mit der Höhe zunehmende Windgeschwindigkeit sowie die dynamische Reaktion des Baumes auf den böigen Wind abbildet.

Insbesondere für letztere sind Verfahren notwendig, die auch einer Dämpfung der Windeinwirkung durch dynamische Effekte innerhalb der Krone Rechnung tragen können (z. B. der Böenreaktionsfaktor gem. DIN 1055–4: 2005). Zusätzliche baumspezifische Standortparameter sind erforderlich, um die Besonderheiten der Windanströmung innerhalb der rauen bodennahen Schicht, in der sich die Baumkronen befinden, sowie Interaktionseffekte zwischen benachbarten Bäumen angemessen abbilden zu können. Diese wurden in der Fachliteratur mehrfach beschrieben (RUDNICKI et al. 2001, 2008), aber kaum quantifiziert. Werden sie jedoch bei der Analyse völlig außer Acht gelassen oder im Rahmen des Windmodells nicht korrekt berücksichtigt, kommt es unweigerlich zu Fehleinschätzungen, die den tatsächlichen Gegebenheiten am Baumstandort nicht

gerecht werden. Dies kann dazu führen, dass die Windlasten sowohl über- als auch unterschätzt und die Sicherheitsaussagen dadurch verfälscht werden.

Richt- und Vergleichswerte für Windbelastungen von urbanen Bäumen sind, anders als für Gebäude, kaum verfügbar. Zahlreiche Messungen wurden in Forstbeständen (HALE et al. 2012), an sehr jungen Bäumen (KANE & SMILEY 2006), bei vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten (JAMES 2013) oder an extrem windigen Standorten (KOIZUMI et al. 2016; ANGELOU et al. 2019) durchgeführt und sind nicht ohne Weiteres auf andere Bäume und Sturmereignisse übertragbar. Daher ist es durchaus verständlich, dass immer wieder der Versuch unternommen wird, Windlastschätzungen zu vermeiden (MATTHECK et al. 2005) oder relative Betrachtungen zur Sicherheit von Bäumen allein über Tragfähigkeitsverluste anzustellen (KANE et al. 2001). Am Ende lässt sich jedoch eine Sicherheitsbeurteilung für Bäume nicht auf nachvollziehbare Weise erstellen, ohne die zu erwartende Windbelastung mit in Betracht zu ziehen. Zur Zuverlässigkeit der Windlastschätzung liegen über die langjährige empirische Erfahrung hinaus inzwischen auch wissenschaftliche Studien vor, die auf die grundsätzliche Eignung der Verfahren hindeuten, die aktuell in der Baumstatik zum Einsatz kommen (ESCHE et al. 2018; KÖNIG 2018; LOHMANN 2020).

3.3.2 Verwendete Parameter und Prüfkriterien

Die Sensitivität von Windlastschätzungen gegenüber Schwankungen der Eingangsparameter wurde unlängst in einer studentischen Arbeit untersucht (ANDRÉ 2021). Dabei wurde deutlich, dass schwer erfassbare Merkmale, wie die Eigenfrequenz und Dämpfungseigenschaften eines Baumes, nur in ihren Extremwerten sicher erkannt werden müssen. Demgegenüber sind Schätzgrößen von größerer Bedeutung, die bei einer guten Analyse des Baumstandortes mit ausreichender Sachkenntnis eindeutig bestimmbar sind, wie z. B. der sog. Nachbarschaftsfaktor, der Beschleunigungseffekte des Windes in der Nähe hoher baulicher Strukturen abbildet. Ebenso lassen sich weitere wichtige Größen wie die Baumhöhe mit entsprechend guter Ausrüstung und etwas Übung präzise messen. In Zukunft werden lasergestützte Messverfahren für die Erfassung der

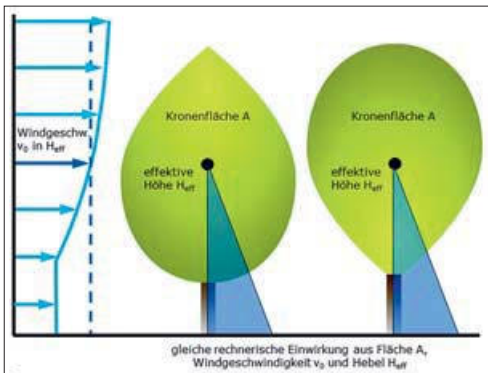


Abbildung 7: Das vereinfachte Verfahren, das Winddruckwerte in der effektiven Höhe auf die Gesamtläche der Krone ansetzt, ist für Bäume nicht ohne Weiteres geeignet. In diesem Beispiel ergäbe sich dabei die gleiche Windbelastung für beide Kronenformen.

Baumgestalt (vgl. VONDERACH 2010) und detaillierte Computersimulationen der räumlichen Verteilung von Windgeschwindigkeiten in innerstädtischen Räumen (z. B. BRUSE et al. 2020) in diesem Bereich noch erhebliche Erleichterungen für die Anwender der Zugversuchsmethode mit sich bringen.

Für eine angemessene Windlastabschätzung muss unbedingt die spezifische Standortsituation berücksichtigt werden. Keinesfalls kann es sinnvoll sein, von absoluten Extremwerten auszugehen, denn die Ergebnisse sind dann nicht mehr brauchbar. Eindrucksvoll zeigte sich das z. B. im öffentlichen Diskurs um den Umgang mit etwa 300 Rosskastanien, die in Groningen, Niederlande, in einem aufgeschütteten Stadtgraben (ein sog. *Singel*) stocken (Abbildung 9). Nach dem Umsturz eines Baumes, dessen Wurzeln massiv vorgeschädigt waren, wurden Zugversuche in Auftrag gegeben. Die Sachverständigen kamen danach zu dem Schluss, dass die Bäume massiv umsturzgefährdet seien und vollständig ersetzt werden sollten. Erst nach weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass bei der Auswertung der ersten Zugversuchsreihen jeweils eine Windwirkung angesetzt wurde, die für ungeschützt stehende Solitärbäume angemessen gewesen wäre. Neue Windlastanalysen unter Berücksichtigung des Standorts der Bäume, die sich zwischen höheren Gebäuden in einem Innenstadtbereich, dicht an dicht stehend, mit

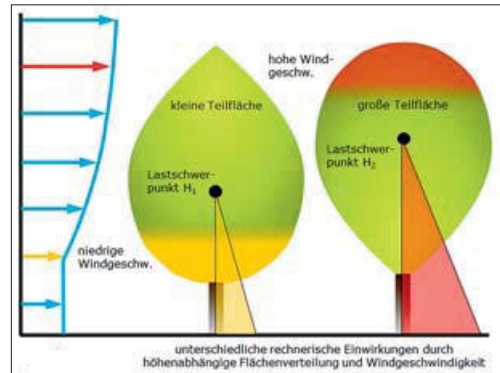


Abbildung 8: Windlastanalyse von Baumkronen nach dem anzuwendenden komplexen Verfahren mittels höhenabhängigem Windprofil und gesonderter Flächenzerlegung. Tatsächlich ist die Windbelastung der rechten Krone deutlich höher als die der linken.

Kronenschluss innerhalb einer zweireihigen Allee entwickelt hatten, führten zu dem Ergebnis, dass die Bäume ohne Weiteres zu halten waren.

Einen ersten Anhaltspunkt dafür, dass wie im vorigen Fall die Windlastabschätzung deutlich zu hoch liegt, bietet die von WESSOLLY (1995) eingeführte sog. Grundsicherheit. Sie nimmt die Widerstandskraft als Ausgangspunkt, die ein Baumstamm gemäß seines in 1 m Höhe gemessenen Durchmessers theoretisch gegenüber einer Biegebelastung erreichen kann, solange er noch ungeschädigt ist. Diese wird dem in der Abschätzung errechneten Winddruck auf die Krone gegenübergestellt (BRUDI 2015). Wurden alle Parameter angemessen eingestuft, sollte die Grundsicherheit zumindest bei Bäumen in der Altersphase den Wert von 1 klar überschreiten. Denn die Erfahrung zeigt, dass Bäume in der Lage sind, sich den Windbelastungen an ihrem Standort so anzupassen, dass sie ausreichend tragfähig sind. Sie integrieren dabei im Laufe ihrer Akklimatisation jedoch auch abschirmende Gebäude und Nachbarbäume, sodass aus deren Wegfall eine erhöhte Versagensgefahr erwachsen kann. Im Alter nimmt die Grundsicherheit mit dem Dickenzuwachs des Stammes deutlich zu (DETTNER & RUST 2019). Dann ist diese Plausibilitätskontrolle nur noch mit viel Erfahrung anhand von Vergleichswerten möglich. Häufig liefert einem erfahrenen Anwender aber der Blick auf

die Grundsicherheit bereits den deutlichen Hinweis darauf, dass wichtige Eingangsparameter oder Schätzgrößen nicht korrekt angesetzt wurden oder z. B. eine Fehlmessung bei der Baumhöhe vorliegt.

3.4 Die Auswertung

3.4.1 Eignung der verwendeten Indikatoren

Für die Verarbeitung der Daten zu Sicherheitsfaktoren gegenüber Kippen oder Bruch im Sturm gibt es mehrere Methoden, die derzeit im Rahmen des Zugverfahrens angewendet werden. Bei der Schätzung der Bruchsicherheit gehen sie alle sehr ähnliche Wege, während sie sich bei der Standsicherheitsanalyse teils systematisch unterscheiden (MÄNNL et al. 1999).

Viele greifen jedoch auf die sog. Verallgemeinerte Kippkurve (WESSOLLY 1996) zurück, um die mindestens vorhandene Verankerungskraft der Wurzeln aus der zerstörungsfreien Messung zu prognostizieren. Auch wenn vereinzelt dabei erhebliche Abweichungen aufgetreten sind (RUST & DETTER 2019), kann die grundsätzliche Eignung der Messdaten, die im statischen Zugversuch ermittelt werden, für die Hochrechnung wissenschaft-

lich bestätigt werden (SMILEY 2008; DETTER & RUST 2013, 2018; DETTER et al. 2019a, c; KRISĀNS et al. 2022).

Auch die Messung der Biegesteifigkeit mit Elastometern oder Dehnungsmessern ist nachweislich dazu geeignet, die Bruchbelastbarkeit des Stammes zu prognostizieren (KANE 2014). Allerdings muss klar darauf hingewiesen werden, dass sich die Hochrechnung dabei nur auf das sog. Primärversagen, nicht aber auf den endgültigen Bruch des Stammes bezieht (DETTTER et al. 2015). Zwar kann im Zugversuch aus den aufgezeichneten Dehnungs- und Kraftwertepaaren nur die Biegesteifigkeit ermittelt werden, diese ist aber ein sehr guter Indikator für die Biegebelastbarkeit der gesamten Struktur (RUEL et al. 2010; DETTER et al. 2014). Dies gilt allerdings nur, solange bei der Messung auch tatsächlich die Dehnung bzw. Stauchung von repräsentativen Holzfasern erfasst wurde.

3.4.2 Wichtige Einflüsse auf die Hochrechnung

Falls die mechanischen Eigenschaften des Holzes erheblich verändert sind, z. B. bei der Messung eines abgestorbenen Holzkörpers, wären die Hochrechnungen irreführend. Deswegen muss bei der Auswertung immer

Abbildung 9:
Untersuchung
von Ross-
kastanien in
Groningen, NL



geprüft werden, ob die gemessenen Werte dem Zustand des Baumes entsprechen, ob also z. B. ein vorhandener Pilzbefall auch tatsächlich die Biegesteifigkeit des Stammes verändert hat. Dies lässt sich anhand der sog. Reststeifigkeit feststellen, die die gemessene Steifigkeit mit den Materialwerten intakten Holzes in Verhältnis setzt. In Laboruntersuchungen wurde beispielsweise durch Schlagbiegeversuche an Kleinproben gezeigt, dass im Frühstadium einer Infektion durch den Brandkrustenpilz (*Kretzschmaria deusta*) die Steifigkeit des Holzes noch erhalten blieb, während die Festigkeit bei Tests mit einem Fraktometer bereits reduziert war (sog. „Versprödung“, SCHWARZE 1995).

Die erwarteten Auswirkungen solcher Materialveränderungen auf das Zugverfahren wurden an stehenden Bäumen jedoch bislang nicht nachgewiesen. Das mag daran liegen, dass der äußere, auch bei einer vorhandenen Kernfäule noch ungeschädigte Ring intakten Holzes das Biegeverhalten des Stammes prägt. Aufgrund seiner Position am Rand des Querschnitts ist er mechanisch ungleich wirksamer als die inneren Bereiche, deren Materialeigenschaften sich ändern. Daher können die Hochrechnungen auch bei Pilzbefall als zuverlässig angesehen werden. Erst wenn die Schale intakten Holzes bis auf wenige Zentimeter ausgehöhlt ist oder großflächig durchwachsen wurde, könnten Fehleinschätzungen auftreten. Um dem vorzubeugen, müssen die Kontrollwerte der Messung stets mit den Ergebnissen der visuellen Untersuchung abgeglichen, in absoluten Ausnahmefällen sogar mit weiteren Untersuchungen, z. B. mittels Schall- und Widerstandstomografie, verglichen werden.

Anders als bei diesen eher theoretischen Ableitungen aus Laborversuchen wurde ein gravierender Einfluss von starkem, lang anhaltendem Frost auf das Ergebnis der Zugversuche auch in der Praxis nachgewiesen (DETTNER & RUST 2013). Die gemessenen Daten selbst enthalten keine erkennbaren Hinweise auf Temperatureinflüsse, sodass die klimatischen Verhältnisse zum Zeitpunkt vor und während der Untersuchungen bei der Auswertung beachtet werden müssen. Insbesondere, wenn die Daten nicht vom Anwender selbst, sondern von Franchisegebern ausgewertet werden, könnten gefährliche Fehleinschätzungen passieren. Denn die bei Frost gemessenen Bäume erscheinen hinsichtlich der Standsicherheit teils mehr als doppelt so sicher, und in

Bezug auf ihre Bruchsicherheit noch um bis zu 50 % belastbarer, als sie tatsächlich sind. Kurzzeitiger Frost oder ein geringes Unterschreiten des Gefrierpunktes im Boden verursachen jedoch nur sehr geringe Abweichungen (DETTNER et al. 2019a).

Auch wenn stammnahe Verankerungswurzeln vollständig fehlen, kann die Hochrechnung der Standsicherheit fehlschlagen und zu einer Überschätzung der Verankerungskraft führen. Das haben einzelne Messungen bis zum Kippversagen gezeigt (BADER 2000). Dabei handelt es sich um Sonderfälle, die durch eine intensive visuelle Untersuchung, die ohnehin am Anfang jedes Geräteeinsatzes stehen muss, sicher erkannt werden können. Im Gegensatz dazu werden Bäume, die erst kurz zuvor im Sturm angekippt, aber nicht vollständig entwurzelt wurden, bei der Auswertung zu schlecht behandelt. Deren Verankerungskraft liegt deutlich über der Schätzung (DETTNER et al. 2019c), wenn bei der Auswertung keine Anpassung vorgenommen wurde. Demgegenüber haben Änderungen der Bodenfeuchte, anders als oft vermutet, meist einen vergleichsweise geringen Einfluss (WOHN 2003; RUST et al. 2013). Lediglich an Standorten, wo das Grundwasser von einem ansonsten sehr hohen Spiegel zeitweilig stark abgesunken war, überschätzten klassische Auswertungen der Inclinomethode die Standsicherheit systematisch, aber auf geringem Niveau (DETTNER et al. 2019a). Auch solche geringen Einflüsse können und sollen aber im Zugverfahren erfasst und berücksichtigt werden, um Fehleinschätzungen zu vermeiden.

3.4.3 Umgang mit möglichen Fehlerquellen

Der Auswertevorgang bei der Zugversuchsmethode erfordert profundes Fach- und Spezialwissen, um Kontrollwerte abzurufen, Anpassungen durchzuführen und Rechenergebnisse zu vergleichen sowie anhand der Daten und Aufzeichnungen zu verifizieren. Beispielsweise bedürfen die Hochrechnungen nahezu immer einer entsprechenden Anpassung, wenn Zugversuche an jüngeren Bäumen durchgeführt werden. Diese unterscheiden sich sowohl aerodynamisch als auch in ihrem Bruch- und Kippverhalten maßgeblich von Gehölzen mit mehr als 20 cm Stammdurchmesser. Durch Vorspannung können sie die Bruchsicherheit ihrer Stämme erhöhen (KUBLER 1987), ihre Verankerung ist bei gleicher Belastbarkeit offenbar nachgiebiger

(DETTNER et al., Publ. eingereicht). Entscheidend für die Sicherheitsanalysen können hier Vergleiche zwischen den verschiedenen Sicherheitswerten sein, um dennoch eine verminderte Stand- oder Bruchsicherheit nachweisen zu können.

Für größere Gehölze liegen langjährige Erfahrungen mit unzähligen Auswertungen und wissenschaftliche Erkenntnisse zur Eignung der gängigen Verfahren vor. Die SAG Standards schreiben hier lediglich vor, dass die angewandte Methode eindeutig benannt und wissenschaftlich überprüft oder durch langjährige Anwendung empirisch abgesichert sein muss. In Sonderfällen, z. B. wenn die Materialwerte der botanischen Art nicht vorliegen, sollen Messungen in einem schadfreien Bereich zum Abgleich der Eigenschaften der vorliegenden Spezies mit bekannten Referenzarten vorgenommen und die Werte entsprechend angepasst werden.

Die häufig verwendeten und teilweise auch kritisierten Materialwerte des sog. Stuttgarter Festigkeitskatalogs (u. a. WESSOLLY 1989b; SINN 2003; WESSOLLY & ERB 2014) zeigen keine großen Abweichungen zu anderen Materialkatalogen (z. B. LAVERS 1983; KRETSCHMANN 2010). Der Verweis auf fehlende Dichteabhängigkeit der Festigkeitsdaten (SPATZ & PFISTERER 2013) greift zu kurz, da auch andere Daten, die sich auf das Primärversagen des Holzes beziehen (JESSOME 1977), nicht eng mit dessen Dichte korrelieren. Materialwerte von grünem Holz schwanken auf natürliche Weise und können keineswegs als konstant angesehen werden. Die Angaben im Stuttgarter Festigkeitskatalog, die bislang durch Bruchversuche an stehenden Bäumen überprüft wurden, sind offenbar eine Untergrenze der natürlichen Schwankungsbreite (DETTNER & RUST 2019). Damit lässt sich die Bruchsicherheit geschädigter Bäume zwar sicher nachweisen, gerade bei ungeschädigten Bäumen kann die tatsächliche Belastbarkeit des Stammes aber höher liegen als nach den Ergebnissen des Zugversuchs angenommen.

Die Festigkeitswerte beziehen sich auf Faserstauchungen auf der Druckseite, die auch bei sehr großem Hohlungsgrad das sog. Primärversagen bilden, während die Rissbildung in der dünnen Schale erst später im Versagensprozess einsetzt. Dies haben praktische Versuche an über zwei Dutzend extrem hohlen Bäumen gezeigt (NOVAK 2014). Wissenschaftlich publizierte Studien, die

hier zu einem anderen Ergebnis gekommen sind (HUANG et al. 2017), basieren nicht auf praktischen Versuchen, sondern auf biomechanischen Berechnungen. Dabei wurden in Bezug auf die Rissbildung, offenbar in Ermangelung konkreter Daten, die Eigenschaften trockenen Holzes unterstellt. Die Rissbildung erfolgt bei massiv ausgehöhlten Bäumen aber stets im verbliebenen, lebenden Splintholz, das viel dehnbarer und risstoleranter als ein abgetrockneter Holzkörper ist. Daher erscheinen die Ergebnisse dieser theoretischen Analysen nicht auf die Untersuchung lebender Bäume übertragbar.

3.4.4 Grenzen der Auswertung

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Hochrechnungen ist v. a. auch die Qualität der aufgezeichneten Messwerte ausschlaggebend. Je größer die Datendichte, je weniger die Daten schwanken und je weiter sie an den Beginn des Versagens heranreichen, desto größer wird die Treffsicherheit der Extrapolationen (RUST 2014). Durch die konstante, kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte, die mit den modernen Messgeräten nunmehr seit fast 15 Jahren verfügbar ist, werden pro Zugversuch meist deutlich über 200 zeitlich synchronisierte Einzelmessungen von mehreren Sensoren gespeichert. Dies bringt entscheidende Vorteile bei der Analyse der Daten, der Belastbarkeit der Hochrechnungen und bei der Fehlererkennung.

Im Zuge der Auswertung müssen aber dennoch Abschläge bei den errechneten Sicherheitswerten berücksichtigt werden, wenn nur sehr geringe Reaktionen erzielt wurden, um die daraus resultierende erhöhte Unsicherheit auszugleichen. Meist betrifft dies nur die Stammfußneigung bei sehr großen alten Bäumen, gerade weil sie über eine so hohe Verankerungskraft verfügen. Messtechnisch absolut unzulässig ist jedoch die Verwertung von „Nullmessungen“ als Nachweis der Standsicherheit, wenn z. B. aufgrund mangelnder Auflösung keine Neigungsänderung aufgezeichnet wurde. Stützen Sachverständige, wie in einem Fall dokumentiert, ihre positive Sicherheitsaussage auf einen solchen fehlenden Ausschlag der Geräte, bewegen sie sich im Bereich reiner Spekulation.

Grundsätzlich ist es unabdingbar, dass sich Sachverständige der Grenzen der eingesetzten Auswertungsmethoden

bewusst sind. Unwägbarkeiten werden im Ingenieurwesen durch ausreichende Sicherheitsbeiwerte kompensiert. Für Baustatiker ist dies eine Standard-Vorgehensweise, die sich aber auf Bäume nur eingeschränkt übertragen lässt. Bäume wachsen nicht nur, um den zu erwartenden Belastungen widerstehen zu können. Ihr Wachstum mag zwar u. a. von mechanischen Reizen gesteuert werden, sie müssen mit ihrer Entwicklung aber auch andere Ziele erreichen, um zu überleben. Daher ist ihr statisches System nicht mit so großen Sicherheitsreserven ausgestattet wie ein von Hochbauingenieuren statisch bemessenes Gebäude. Dafür sind Bäume in der Lage, Schwachstellen und Schäden, die im Laufe der Zeit an tragenden Teilen entstehen, durch Abschottung und Kompensationswachstum auszugleichen. Dem muss auch eine Auswertung von Zugversuchen Rechnung tragen, indem realistische Sollwerte für die rechnerischen Sicherheiten der Bäume angesetzt werden, die die beachtliche Resilienz ihrer tragenden Struktur berücksichtigen.

3.5 Das Gutachten

3.5.1 Aufbau und Inhalt

In einem Gutachten müssen alle wesentlichen Elemente der Untersuchung so dargestellt werden, dass die Ergebnisse für Fachleute vollständig nachvollziehbar sind und für Laien zumindest verständlich werden. Fachgutachten sollen in Aufbau und Inhalt dabei grundsätzlich ähnlich wie wissenschaftliche Arbeiten gestaltet werden. Daher genügt es nicht, die Ergebnisse der Messung abzudrucken. Vielmehr müssen alle wichtigen Angaben zum Messaufbau, zur Platzierung der Sensoren und zum Ablauf der Messung dokumentiert sein. Ebenso muss die Festlegung wichtiger Parameter, z. B. der gewählten Lastrichtung, der Kennwerte der Windstruktur oder der angesetzten Strukturparameter für das Verhalten des Baumes im Wind, erläutert und nachvollziehbar begründet werden.

Im Zusammenspiel mit den Ergebnissen der visuellen Untersuchung sollte im Gutachten unbedingt der Schritt von der Beurteilung des Ist-Zustandes im Zugversuch zum Entwicklungspotenzial des Baumes vollzogen werden. Dazu können Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Werten für Grund-, Stand- und

Bruchsicherheit wichtige Hinweise auf das Ausmaß vorhandener Schäden geben. Die Veränderung der Tragfähigkeit gegenüber früheren Untersuchungen kann herangezogen werden, um die Entwicklung der Statik des Baumes zu erfassen, während der Abgleich mit seinem Vitalitätszustand eine wichtige Rolle dabei spielt, die zukünftige Kompensationsfähigkeit einzuschätzen. Ein verwertbares Gutachten ist dadurch gekennzeichnet, dass die Ergebnisse des Zugverfahrens nicht die alleinige Grundlage für die Empfehlungen sind, sondern als ein wichtiger, aber nicht als einziger Teil des Befunds verwertet werden. Gerade anhand der klassischen, visuell erkennbaren Merkmale kann oft der sinnvolle weitere Umgang mit einem wertvollen Altbaum vorgezeichnet werden.

Von einem Gutachten erhoffen sich Besteller i. d. R. zuverlässige und plausible Empfehlungen, wie mit dem Baum verfahren werden soll. Dies umfasst neben eventuellen baumpflegerischen Maßnahmen auch Angaben zu Regelkontrollen und dabei zu beachtenden Hinweisen für eine maßgebliche Veränderung des Zustands des Baumes. Auch der Zeitpunkt einer Nachuntersuchung sollte gegebenenfalls aus dem Gutachten eindeutig hervorgehen, damit der Auftraggeber seine Sicherungspflicht angemessen wahrnehmen kann. Die Haftung des Sachverständigen erstreckt sich in der Regel nur auf die Zeit bis zur nächsten Untersuchung (BRELOER 2004). Da es sich bei Bäumen um lebende Organismen handelt, die teils widrigen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, spielen bei der zeitlichen Festlegung von Nachuntersuchungen die vorhandenen Sicherheitsreserven, die aktuell ermittelt wurden, und die Art der vorhandenen Schäden am Baum eine wesentliche Rolle. In fehlenden oder zeitlich zu weit gefassten Angaben zum Zeitpunkt einer Nachuntersuchung könnte bei einem Unfall eine Haftung des Sachverständigen begründet werden. Insofern sind Intervalle zwischen drei und acht Jahren sinnvoll. Diese sollten aber nicht überzogen eng gesetzt werden, hält man sich die Kosten der Untersuchung vor Augen.

3.5.2 Hinweise zur Ausschreibung

Sachverständigengutachten sollten wie andere geistige Leistungen unter besonderen vergaberechtlichen Vorgaben ausgeschrieben werden (SCHMIDT & WESSOLLY 2021). Hier käme v. a. die Verhandlungsvergabe mit

oder ohne Teilnehmerwettbewerb infrage. Bei diesem Verfahren wendet sich der Auftraggeber grundsätzlich an mehrere ausgewählte Unternehmen, um mit einem oder mehreren über die Auftragsbedingungen zu verhandeln. Verhandeln darf er dann über sämtliche Aspekte des Auftrags bzw. Inhalte des Angebots, es sei denn, er hat vorab in einer Leistungsbeschreibung Mindestanforderungen und Zuschlagskriterien festgelegt (T. AMTAGE, pers. Mitt.). Die reguläre Vergabe würde bei Baumgutachten schon daran scheitern, dass in Bezug auf die Verkehrssicherheit wertvoller Altbäume an urbanen Standorten die Frage nach dem wirtschaftlichsten Angebot gar nicht eindeutig beantwortet werden könnte. Ist ein Angebot noch wirtschaftlich, wenn es zwar günstig ist, aber aufgrund fachlicher oder methodischer Schwächen zum starken Rückschnitt oder zur Fällung der Bäume führt? Oder andererseits, wenn es aufgrund von systematischen Fehlern eine Beschädigung des Baumes, eine Gefährdung Dritter und damit ein unkalkulierbares Haftungsrisiko nach sich zieht?

Für Vergabestellen lässt sich die Qualität von Sachverständigenleistungen aber oft weder vor der Auftragsvergabe noch nach Abschluss der Leistung zuverlässig beurteilen. Bis heute liegen keine standardisierten Ausschreibungstexte für eingehende technische Baumuntersuchungen vor, die eine zumindest ansatzweise Vergleichbarkeit von Angeboten gewährleisten könnten. Die Baumuntersuchungsrichtlinien vermögen zumindest in ihrer aktuellen Fassung diese Lücke nicht zu schließen, da sie keine ausreichend prüfbar Maßstäbe für die sachgerechte Anwendung der dort beschriebenen Untersuchungsmethoden liefern (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau 2013).

Den Berichten zahlreicher Besteller in kommunalen oder privaten Verwaltungen ist zu entnehmen, dass bei der Vergabe von Gutachten zur Verkehrssicherheit von Bäumen heute leider Ergebnisse sehr unterschiedlicher Qualität erzielt werden. Spezielle technische Standards, die allgemeine Anforderungen an die Ausführung einer eingehenden Untersuchung so klar wie möglich definieren, können hier regulierend wirken und den Markt auf die sachgerechte Ausführung von Sachverständigenleistungen begrenzen. Zugleich kann ein allgemeiner Standard mit klaren technischen Vorgaben eine wertvolle Vertragsgrundlage für alle Beteiligten bieten.

4 Fazit

Die Zugversuchsmethode ist ein etablierter Ansatz, der es z. B. ermöglicht, wertvolle Bäume nach Eingriffen in ihren Wurzelbereich zu erhalten oder die Verkehrssicherheit trotz ausgedehnter Schäden am Holzkörper zu gewährleisten. Gerade deren Funktion als Habitate, ihre kulturelle Bedeutung und die vielfältigen Umweltleistungen, die sie im urbanen Umfeld erbringen können, machen solche Altbäume besonders erhaltenswert. Deren Eigentümern und Verwaltern können erfahrene Sachverständige mithilfe der Zugversuchsmethode nachvollziehbare und belastbare Informationen zur Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit und des Erhaltungspotenzials zur Verfügung stellen. Da sie allgemeinen ingenieurtechnischen Grundsätzen folgt, sind mit der Zugversuchsmethode erzielte Ergebnisse besonders geeignet, einer zunehmend interessierten Öffentlichkeit die Entscheidungen über den Umgang mit geschädigten Bäumen zugänglich und deren Gründe verständlich zu machen.

Allerdings ist die Zugversuchsmethode wie viele andere Verfahren, mit denen Ingenieure die Sicherheit von Strukturen beurteilen, zugleich komplex. Sie basiert auf der Mechanik und greift in zahlreichen Details auf Richtwerte und Schätzgrößen zurück. Daher können unzureichend ausgebildete und unerfahrene Anwender auch viele Fehler machen. Letztlich ist die Qualität, wie in vielen anderen Bereichen auch, nur dann gewährleistet, wenn die Leistung sinnvoll ausgeschrieben wurde, die beauftragten Personen gut ausgebildet sind und die Messungen korrekt durchgeführt und belastbar ausgewertet wurden. Ein nachvollziehbares Gutachten sollte alle Elemente der Untersuchung verständlich darstellen und daraus praktikable Empfehlungen ableiten.

Hier möchte die SAG Baumstatik mit der Vorlage der neuen Standards für Zugversuche ansetzen. Mit ihrer breiten internationalen Basis und langjährigen Erfahrung haben ihre Mitglieder die Anforderungen an die Anwendung dieser Methode erstmals als Richtlinien zusammengefasst (vgl. hierzu www.sag-baumstatik.org). Im Hinblick auf die stark gestiegene Nachfrage und den wachsenden Anbieterkreis soll dadurch die Vergleichbarkeit der Angebote verbessert und das sachgerechte Arbeiten mit der Zugversuchsmethode

gewährleistet werden. Angesichts des Potenzials des Zugverfahrens, zum langfristigen Erhalt von Altbäumen in der Stadt beizutragen, wäre es wünschenswert, dass die SAG Standards den interessierten Fachkreisen als Anregung dienen und auf möglichst breiter Basis angenommen werden.

Danksagung

Unser Dank gilt den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen, die innerhalb und außerhalb der SAG Baumstatik den hier dargestellten Stand des Wissens über Zugversuche durch ihr Engagement, eigene Studien und den offenen fachlichen Austausch vorangebracht haben. Wir möchten auch den vielen Forschern, Studierenden und Unterstützern danken, die durch ihren Einsatz die wissenschaftlichen Versuche ermöglicht haben, auf deren Grundlage wir heute über neue Erkenntnisse verfügen. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts und ihre wertvollen Anregungen danken wir *L. Wilms, T. Amtage* und *D. Dujesiefken*. Bildnachweis: Brudi & Partner TreeConsult, Gauting, wenn Quelle nicht anders angegeben

Literatur

- ANDRÉ, T., 2021: Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse eines Windlastmodells für Solitärgehölze [Bachelorarbeit]. HAWK Göttingen Hildesheim Holzminde.
- ANGELOU, N.; DELLWIK, E.; MANN, J., 2019: Wind load estimation on an open-grown European oak tree. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 92(4), 381–392, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz026>.
- BADER, C., 2000: Untersuchungen über den statisch wirksamen Wurzelraum [Diplomarbeit]. Fachhochschule Nürtingen.
- BRUDI, E., 2015: TreeCalc.com – Baumsicherheitsberechnung Online. Deutsche Akademie für Sachverständige Grün, dasgrün.de (Hrsg.): Gehölzsymposium 2015, Hannover, 135–141.
- BRUSE, M.; DINGENDAHL, J.; KAUFELS, P.; BÖSKEN, N.; KRUSE, P., 2020: BaumAdapt Handlungsleitfaden – Empfehlungen für das Stadtbaummanagement im Spannungsfeld zwischen Klimaanpassung, Erhalt von Ökosystemleistungen und dem Schutz kritischer Infrastrukturen. Stadt Essen und TU Dortmund (Hrsg.), <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16955.64802>.
- COUTTS, M. P., 1983: Root architecture and tree stability. *Plant and Soil*, 71, 171–188.
- DAHLE, G.; JAMES, K.; KANE, B.; GRABOSKY, J.; DETTER, A., 2017: A review of factors that affect the static load-bearing capacity of urban trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 43(3), 89–106.
- DAVENPORT, A. G., 1960: Rationale for determining design wind velocities. *ASCE Journal of the Structural Division*, 86, 39–68.
- DETTNER, A.; BRUDI, E.; BISCHOFF, F., 2010: Messverfahren und Bewertungsmethoden zur Verkehrssicherheit. *AFZ-DerWald*, 8, 34–35.
- DETTNER, A.; RICHTER, K.; RUST, C.; RUST, S., 2015: Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2015*, Haymarket Media, Braunschweig, 156–167.
- DETTNER, A.; RUST, S., 2013: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2013*. Haymarket Media, Braunschweig, 87–100.
- DETTNER, A.; RUST, S., 2018: Grundlagen und Kriterien zur visuellen Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2018*. Haymarket Media, Braunschweig, 145–160.
- DETTNER, A.; RUST, S., 2019: Angewandte Baumstatik – Was man aus Zugversuchen für die visuelle Baumkontrolle lernen kann. In: *Aktuelle Fragen der Baumpflege und -verwendung, Management und Verwendung von Stadtbäumen: Bd. Beiheft 21*, 56–76.
- DETTNER, A.; RUST, S.; BÖTTCHER, J.; BOULLION, J., 2019a: Ambient influences on the results of non-destructive pulling tests. *Proceedings of the 21st non-destructive testing and evaluation of wood symposium 2019*, Freiburg.
- DETTNER, A.; RUST, S.; KRISÄNS, O., (Publ. eingereicht): Experimental test of non-destructive methods to assess the anchorage of trees.
- DETTNER, A.; RUST, S.; RUST, C.; MAYBAUM, G., 2014: Determining strength limits for standing tree stems from bending tests. 18th international non-destructive testing and evaluation of wood symposium.
- DETTNER, A.; RUST, S.; WASSENAER, P. v., 2019b: Zur Neuverankerung angekippter Platanen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2019*. Haymarket Media, Braunschweig, 262–265.
- DETTNER, A.; WASSENAER, P. v.; RUST, S., 2019c: Stability recovery in London Plane trees 8 years after primary anchorage failure. *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(6), 279–288.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) 2005: DIN 1055–4 [2005–03] Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten.
- Deutsches Institut für Normung (DIN) 2010: DIN EN 1991–1–4 [2010–12] Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten.
- ESCHE, D.; SCHUMACHER, P.; DETTNER, A.; RUST, S., 2018: Experimentelle Überprüfung der Windlastanalyse für statische Zugversuche. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2018*. Haymarket Media, Braunschweig, 229–236.
- FOBO, W., 1986: Zum Tragverhalten der Bäume. SFB 230: Natürliche Konstruktionen, Leichtbau-Architektur und Natur. Universität Stuttgart/Tübingen.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, 2013: Baumuntersuchungsrichtlinien: Richtlinien für eingehende Untersuchungen zur Überprüfung der Verkehrssicherheit von Bäumen.
- GÖCKE, L.; RUST, S., 2015: Correlation of wind speed and root plate tilt of trees in urban environment. In: *ISA Annual Conference*, 20–23.
- HALE, S. E.; GARDINER, B. A.; WELLPOTT, A.; NICOLI, B. C.; ACHIM, A., 2012: Wind loading of trees: Influence of tree size and competition. *European Journal of Forest Research* 131 (1), 203–17, <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0448-2>.
- HUANG, Y.-S.; HSU, F.-L.; LEE, C.-M.; JUANG, J.-Y., 2017: Failure mechanism of hollow tree trunks due to cross-sectional flattening. *Royal Society Open Science*, 4(4), 160972, <https://doi.org/10.1098/rsos.160972>.
- JAMES, K., 2013: Die Dynamik der Bäume im Wind. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege*. Haymarket Media, Braunschweig, 79–86.
- 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. R.; DAHLE, G. A.; GRABOSKY, J.; KANE, B.; DETTER, A., 2014: Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(1), 1–15.
- JESSOME, A. P., 1977: Strength and related properties of woods grown in Canada. Eastern Forest Products Laboratory.
- JONSSON, M. J. O., 2007: Energy absorption of trees in a rockfall protection forest [Doktorarbeit]. Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.
- KANE, B., 2014: Determining parameters related to the likelihood of failure of red oak (*Quercus rubra* L.) from winching tests. *Trees – Structure and Function*, 28(6), 1667–1677, <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1076-0>.
- KANE, B.; RYAN, D.; BLONIAZ, D. V., 2001: Comparing formulae that assess strength loss due to decay in trees. *Journal of Arboriculture*, 27(2), 78–87.
- KANE, B.; SMILEY, E. T., 2006: Drag coefficients and crown area estimation of red maple. *Canadian Journal of Forest Research*, 36, 1951–1958.
- KOZUMI, A.; SHIMIZU, M.; SASAKI, Y.; HIRAI, T., 2016: In situ drag coefficient measurements for rooftop trees. *Journal of Wood Science*
- KÖNIG, M., 2018: Experimentelle Überprüfung von Windlastanalysen am Beispiel einer Bergahornallee [Bachelorarbeit]. HAWK Göttingen Hildesheim Holzminden.
- KRETSCHMANN, D., 2010: Mechanical Properties of Wood. In: *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. 508.
- KRIŠĀNS, O.; ČAKŠA, L.; MATISOVS, R.; RUST, S.; ELFERTS, D.; SEIPULIS, A.; JANSONS, Ā., 2022: A Static Pulling Test Is a Suitable Method for Comparison of the Loading Resistance of Silver Birch (*Betula Pendula* Roth.) between Urban and Peri-Urban Forests. *Forests* 13(1), 127, <https://doi.org/10.3390/f13010127>.
- KRIŠĀNS, O.; MATISOVS, R.; KITENBERGA, M.; DONIS, J.; RUST, S.; ELFERTS, D.; JANSONS, Ā., 2020a: Wind Resistance of Eastern Baltic Silver Birch (*Betula Pendula* Roth.) Suggests Its Suitability for Periodically Waterlogged Sites. *Forests* 12(1), 21, <https://doi.org/10.3390/f12010021>.
- KRIŠĀNS, O.; MATISOVS, R.; RUST, S.; BURNEVICA, N.; BRUNA, L.; ELFERTS, D.; KALVANE, L.; JANSONS, Ā., 2020b: Presence of Root Rot Reduces Stability of Norway Spruce (*Picea Abies*): Results of Static Pulling Tests in Latvia. *Forests* 11(4), 416, <https://doi.org/10/ggsjrt>.
- KRIŠĀNS, O.; SALENIECE, R.; RUST, S.; ELFERTS, D.; KAPOSTINS, R.; JANSONS, Ā.; MATISOVS, R., 2020c: Effect of Bark-Stripping on Mechanical Stability of Norway Spruce. *Forests* 11, 8, <https://doi.org/10/gg48rf>.
- KUBLER, H., 1987: Growth stresses in trees and related wood properties. *Forest Products Abstracts*, 10(3), 61–119.
- KUEBART, L., 2016: Untersuchungen zur Rückstellung der induzierten Neigung bei zerstörungsfreien Zugversuchen [Bachelorarbeit]. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.
- KÜLL, U.; HERBIG, A., 1988: Pflanzen als natürliche Konstruktionen und das Prinzip Leichtbau. SFB 230: Natürliche Konstruktionen, Leichtbau-Architektur und Natur. Universität Stuttgart/Tübingen, 1.
- LAVERS, G. M., 1983: The strength properties of timber (3. Aufl.). Building Research Establishment Report.
- LOHMANN, C., 2020: Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen durch statische Zugversuche und Wind-Neigungs-Messungen [Bachelorarbeit]. HAWK Göttingen Hildesheim Holzminden.
- 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(9), 1217–1227.
- MÄNNL, U.; SINN, T.; SINN, G., 1999: AfB-Methode und Inclino-Methode. *Stadt und Grün*, 48(8), 549–552.
- MARCHI, L.; MOLOGNI, O.; TRUTALLI, D.; SCOTTA, R.; CAVALLI, R.; MONTECCHIO, L.; GRIGOLATO, S., 2019: Safety assessment of trees used as anchors in cable-supported tree harvesting based on experimental observations. *Biosystems Engineering*, 186, 71–82, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.022>.
- Maschinenrichtlinie, 2006: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlamentes und des Rats der Europäischen Union vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG.
- Maschinenverordnung, 2021: Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (9. ProdSV) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), zuletzt durch Artikel 23 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146) geändert.
- MATTHECK, C.; TESARI, I.; BETHGE, K., 2005: Dimensioning of tree containers without windload assessment. *Arboricultural Journal*, 28, 281–287.
- NOVAK, R., 2014: Überprüfung des Stammversagens hohler Baumstämme anhand von Versuchen und Messungen im Bereich der Stambiegung und Faserstauchung. [Masterarbeit], Universität für Bodenkultur Wien.
- RUDNICKI, M.; MEYER, T.; LIEFFERS, V. J.; SILINS, U.; WEBB, V. A., 2008: The periodic motion of lodgepole pine trees as affected by collisions with neighbors. *Trees – Structure and Function*, 22(4), 475–482, <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0207-2>.
- RUDNICKI, M.; SILINS, U.; LIEFFERS, V. J.; JOSI, G., 2001: Measure of simultaneous tree sways and estimation of crown interactions among a group of trees. *Trees – Structure and Function*, 15, 83–90.
- RUEL, J.-C.; ACHIM, A.; HERRERA, R. E.; CLOUTIER, A., 2010: Relating mechanical strength at the stem level to values obtained from defect-free wood samples. *Trees*, 24(6), 1127–1135, <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0485-y>.
- RUST, S., 2014: Baumuntersuchung – Fehlerquellen und Fehlerfolgen beim Geräteeinsatz. *Gehölzsymposium 2014*, 219–229.
- 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*, Freiburg i. Br.
- RUST, S.; DETTER, A.; FUCHS, C.; SCHIRUTSCHKE, B., 2013: Einfluss der Witterung auf die Ergebnisse statischer Zugversuche. In: DUJE-SIEFEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2013*. Haymarket Media, Braunschweig, 296–300.
- 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, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.04.004>.
- SCHMIDT, D.; WESSOLLY, L., 2021: Ausschreibung von Gutachten zur Baumsicherheit weiter unzulässig. *Stadt und Grün*, 1, 16–21.
- SCHWARZE, F., 1995: Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzerzetzenden Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro. SVK-Verl.
- SINN, G., 1990: Untersuchungen zur Kippursache von Eichen im Riederwald Frankfurt, M. SVK-Verl.
- SINN, G., 2003: Baumstatik: Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Strassen, in Parks und der freien Landschaft: biologische Aspekte und eine Einführung in die Baumstatik unter besonderer Berücksichtigung der Neigungs- und Dehnungsmessverfahren. Thalacker Medien, Braunschweig.
- SINN, G.; SINN, T.; MÄNNL, U., 1992: Die Windlast als Bezugsgröße der Standsicherheitsbestimmung von Bäumen. *Das Gartenamt*, 5, 308.
- SINN, G.; WESSOLLY, L., 1989: A Contribution to the Proper Assessment of the Strength and Stability of Trees. *Arboricultural Journal*, 13, 45–65.

- SINN, T., 2022: Handbuch Baumstatik. Schadenssymptome und Messverfahren zur Feststellung der Stand- und Bruchsicherheit. Quelle & Meyer Verlag GmbH & Co., München, 750 S.
- SMILEY, E. T., 2008: Root Pruning and Stability of Young Willow Oak. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(2), 123–128.
- SPATZ, H.-C.; PFISTERER, J. A., 2013: Mechanical Properties of Green Wood and Their Relevance for Tree Risk Assessment. *Arboriculture & Urban Forestry*, 39(5), 218–225.
- Strafgesetzbuch, § 315: Gefährliche Eingriffe in den Bahn-, Schiffs- und Luftverkehr. Bundesrepublik Deutschland.
- VONDERACH, C., 2010: Terrestrial Laser Scanning for Estimating Urban Tree Volume and Carbon Content [Diplomarbeit], Institut für Geographie und Geoökologie Karlsruhe.
- WESSOLLY, L., 1988: Die natürliche Konstruktion Baum als intelligentes statisch-dynamisches System. *Natürliche Konstruktionen – Mitteilungen des SFB 230*, 2, 203–212.
- WESSOLLY, L., 1989a: Die natürliche Konstruktion Baum ist ein intelligentes statisch-dynamisches System. *Neue Landschaft*, 1989(34), 340–352.
- WESSOLLY, L., 1989b: Materialwerte grüner Hölzer, Stuttgarter Festigkeitskatalog. Bad Godesberger Gehölzseminar, Bad Godesberg.
- WESSOLLY, L., 1991: Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 49, 99–104.
- WESSOLLY, L., 1995: Bruchdiagnose von Bäumen – Teil 2: Statisch integrierte Verfahren – Die statisch integrierte Abschätzung (SIA). *Stadt und Grün*, 8, 570–573.
- WESSOLLY, L., 1996: Standsicherheit von Bäumen. Der Kippvorgang ist geklärt. *Stadt und Grün*, 4, 268–272.
- WESSOLLY, L.; ERB, M., 2014: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer Verlag, Berlin, 288 S.
- WOHN, J., 2003: Untersuchungen zur Standsicherheit von Bäumen bei Wassergehaltsänderungen im Boden [Diplomarbeit], Fachhochschule Nürtingen.

Autoren

Dipl.-Ing. Andreas Detter ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Baumpflege, Verkehrssicherheit von Bäumen und Gehölzwertermittlung. Im Büro Brudi & Partner TreeConsult ist er als Sachverständiger und Referent tätig. Zudem ist er 1. Vorsitzender der SAG Baumstatik e.V.

Dipl.-Ing. Andreas Detter
Brudi & Partner TreeConsult
Baumsachverständige
Berengariastraße 9
82131 Gauting
Tel. (089) 752150
a.detter@tree-consult.org



Paul Muir ist Principal Arboricultural Consultant bei Treework Environmental Practice im Vereinigten Königreich und Mitglied der SAG Baumstatik e.V.



Ing. Luděk Praus, Ph. D., lehrt am Institut für Holzforschung und Holztechnologie der Mendel Universität Brno in der Tschechischen Republik und forscht zum Einsatz von Geräten bei der eingehenden Untersuchung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen.



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

Prof. Dr. Steffen Rust
Hochschule für angewandte
Wissenschaft und Kunst,
Fakultät Ressourcen-
management
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen

