Angewandte Baumstatik – Was man aus Zugversuchen für die visuelle Baumkontrolle lernen kann

Andreas Detter, Brudi & Partner TreeConsult Baumsachverständige, Gauting
Steffen Rust, HAWK Göttingen

1 Einführung

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

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

2 Baumstatische Zugversuche

2.1 Grundlagen

Grundsätzlich wird in der Baumstatik die Tragfähigkeit des Baumes den zu erwartenden Windlasten gegenüber gestellt, um die Sicherheit rechnerisch zu ermitteln. Baumstatische Zugversuche erfolgen in mehreren Arbeitsschritten:

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

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

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

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

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

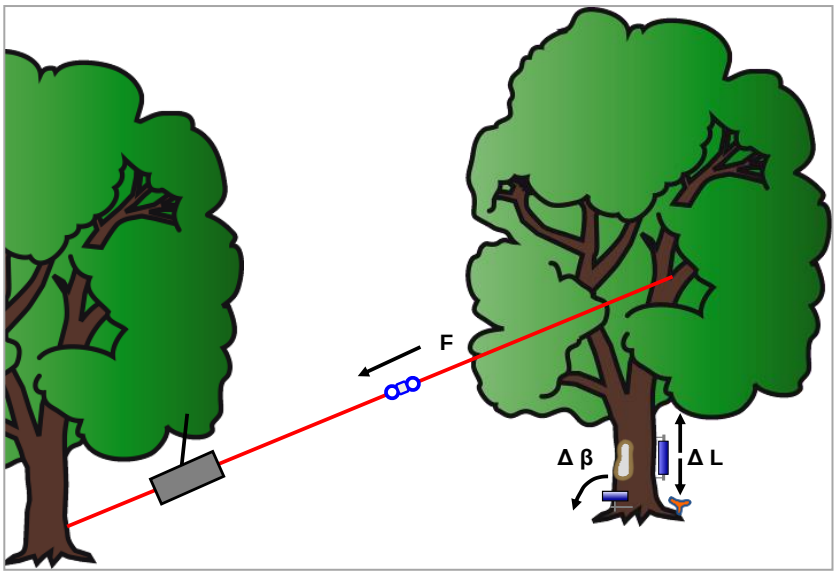
2.2 Zugversuch: Aufbau und Durchführung

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

Drei Messwerte werden kontinuierlich aufgezeichnet:

- die auf den Baum einwirkende Kraft (Auflösung 0,1 kN, also etwa 10 kg),
- die Dehnung bzw. Stauchung der Randfasern im Stamm (Auflösung 1/10.000 mm bei einer Genauigkeit von 1/1.000 mm),
- die Neigung der Wurzelplatte (Auflösung 1/1.000 °, Genauigkeit 1/500°).

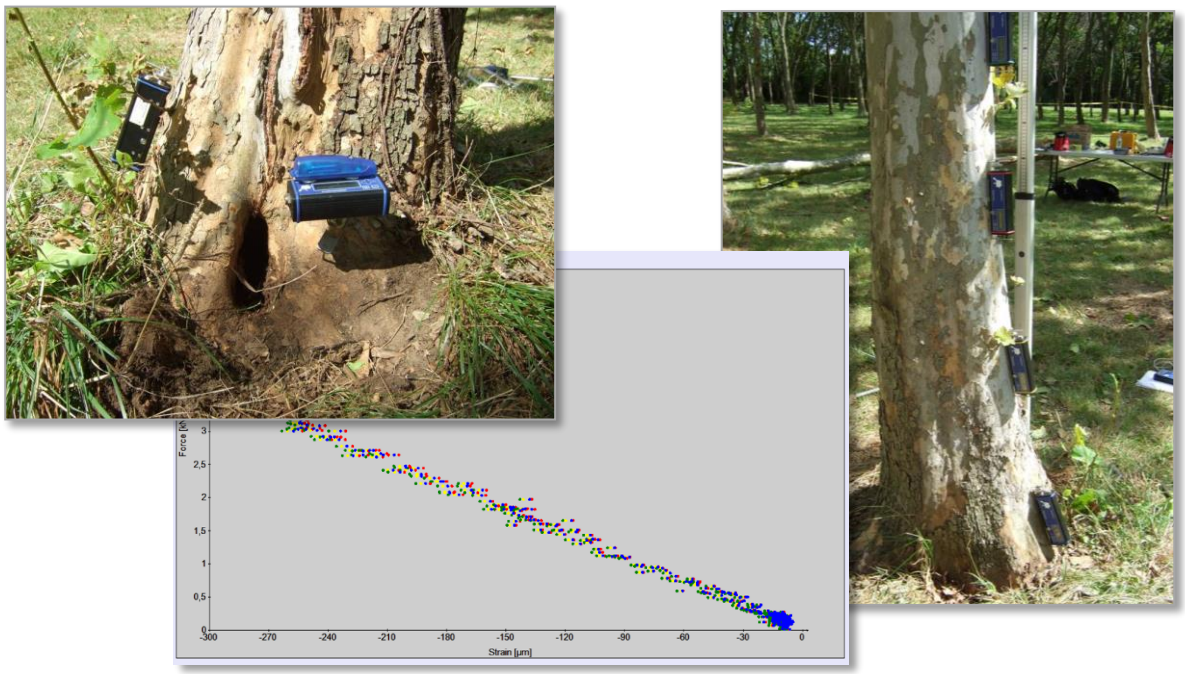
Diese Messdaten können elektronisch gespeichert und an einem Computer überwacht werden. Jeder Zugversuch wird bei vergleichsweise geringen Reaktionen des Baumes beendet. Durch die konstante Überwachung kann sichergestellt werden, dass alle entstandenen Verformungen reversibel sind und der untersuchte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



- Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Zugversuchs

3 Wuchsleistung und Verkehrssicherheit

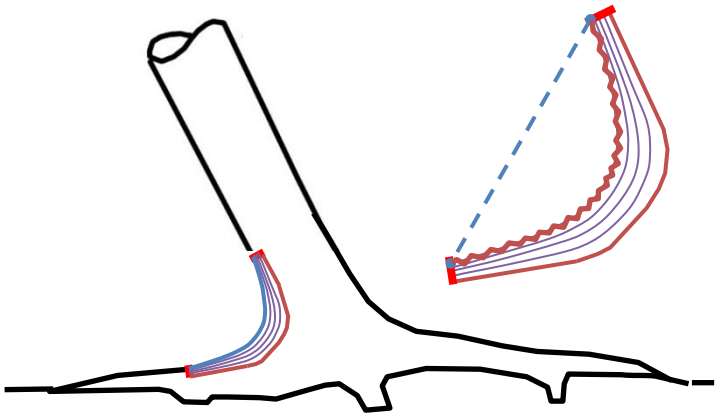
Bäume können ihre Tragfähigkeit durch lokal erhöhten Zuwachs verstärken. Wenn zugleich der intakte Holzkörper durch effiziente Abschottung gegen Fäulefortschritt geschützt wird, kann ein stabile Struktur entstehen, die auf einem fließenden Gleichgewicht aus Holzzuwachs und Holzabbau beruht (Reinartz & Schlag 2006). Dies äußert sich bei der Messung im Zugversuch darin, dass trotz lokalem Holzabbau durch Fäulnis entlang der Randfasern über den gesamten Schadbereich die gleichen Faserdehnungen und –stauchungen gemessen werden. In diesem Fall ist es dem Baum gelungen, den Schaden durch die Verdickung seines Querschnitts vollständig zu kompensieren.



- Abb. 2: kompensierter Schaden durch Fäulnis und Rissbildung am Stammfuß: an allen Messpositionen treten unter Last die gleichen Dehnungswerte auf, daher der identische Verlauf der Messdaten im Diagramm (die Farben stehen für jeweils ein Elastometer)

Dieser Zustand kann sich verändern, wenn die Zuwachsraten z.B. infolge einer starken Kroneneinkürzung einbrechen, oder die Abschottungsfähigkeit durch Vitalitätsprobleme oder Erkrankung wie das Eschentriebsterben drastisch nachlässt. In diesem Fall wird das vormals stabile (und teils noch stabil erscheinende) Gleichgewicht empfindlich gestört, und die Verkehrssicherheit kann maßgeblich vermindert werden. Daher ist eine Koppelung von Zugversuchen mit einer qualifizierten visuellen Untersuchung unverzichtbar, vor allem mit der Beurteilung des Vitalitätszustands und der Anzeichen für Fäulefortschritt.

Manche Merkmale, die bei der visuellen Kontrolle teils als Hinweis auf verminderte Sicherheit interpretiert werden, entpuppen sich bei genauerer Betrachtung aus baumstatischer Sicht jedoch als Hinweis auf erfolgreiche Kompensation. Dazu zählen die Rindenfaltungen am Stammfuß mancher Baumarten sowie auf der Unterseite ausladender Äste. Die Faltungen lassen sich leicht erklären, wenn man sich vorstellt, wie die konkave geformte Struktur unter der äußersten Schicht stark zuwächst. Aus Platzmangel sind die äußeren Schichten gezwungen, sich aufzufalten, wenn von innen das Kambium den Holzkörper verdickt und sich durch den starken Zuwachs der Krümmungsgrad immer weiter verringert (vgl. Ennos 1995). Die Faltungen entstehen also durch rein geometrische Rahmenbedingungen und sind nicht die Folge einer Materialerweichung oder des gefährlichen Absinkens eines Astes.



- Abb. 3: Durch starkes Dickenwachstum in einem nach innen gekrümmten (konkaven) Bereich am Wurzelanlauf, z.B. infolge Stützholzbildung, verkürzt sich die Strecke, die der äußeren Rinde zur Verfügung steht. Dadurch kann eine Faltung der älteren Gewebeschichten, vor allem der Rinde, entstehen.

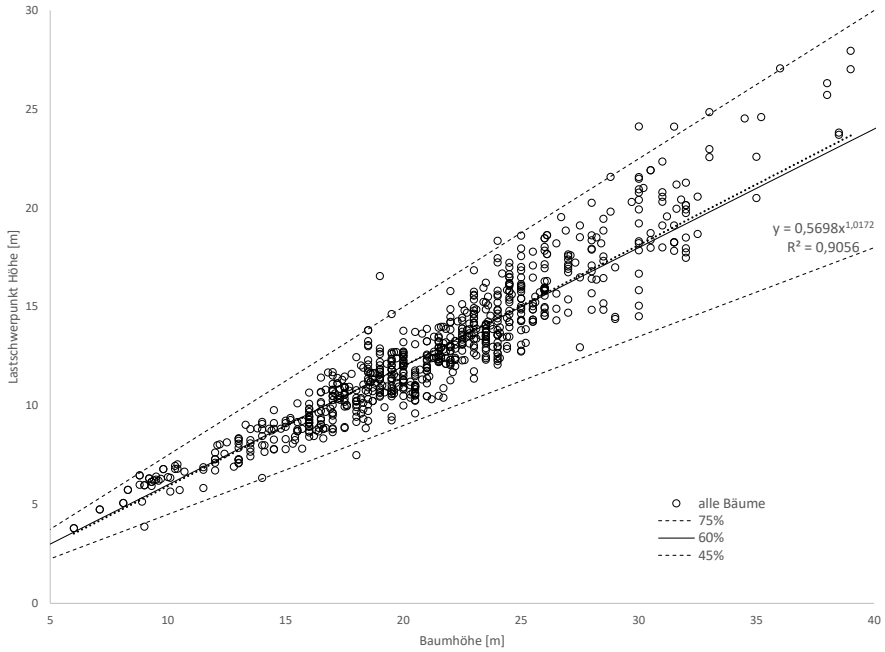
Durch starkes Dickenwachstum versuchen auch schräg stehende Bäume sich zu stabilisieren. Dies geschieht auch bei Laubbäumen stets auf der Unterseite des Stammes und ist besonders stark am Stammfuß ausgeprägt. Es handelt sich hier nicht um Druckholz im eigentlichen Sinne, denn das dient der Veränderung der Wuchsrichtung des Sprosses, indem es sich bei der Reifung ausdehnt – dies wäre aber bei einem Stammfuß mit mehreren Dezimetern Durchmesser nicht mehr möglich. Vielmehr ist der Baum durch dieses sog. Stützholz dazu in der Lage, seine Standsicherheit mit Hilfe des erhöhten Holzvolumens auf der Druckseite des Stammfußes zu erhöhen und sich so in der schrägen Position zu stabilisieren. Biomechanische Modellierungen haben gezeigt, dass die Belastbarkeit verschiedener Wurzelsysteme durch Dickenwachstum genau an

dieser Stelle besonders effizient gesteigert werden kann (Yang et al. 2017). Auch zur Erhöhung der Bruchsicherheit des Stammes reicht der einseitige Zuwachs aus, die Qualität des Holzes hat hier einen geringeren Einfluss auf die Tragfähigkeit als die Vergrößerung des Durchmessers (Larjavaara & Muller-Landau 2010).

4 Windlast und Kronenform

4.1 Lastschwerpunkt

Standardmäßig geht man vielfach davon aus, dass die Windlast in etwa 2/3 der Baumhöhe angreift (Wessolly & Erb 2014). Die Auswertung von etwa 850 Windlastabschätzungen hat gezeigt, dass dies zwar grundsätzlich zutrifft, dass aber erhebliche Abweichungen auftreten können. Im Mittel lag der Windlastschwerpunkt bei etwa 60% der Baumhöhe. Über die Baumhöhe lassen sich über 90% der Streuung in der Position des Lastschwerpunktes erklären. Sie ist also der maßgebliche Indikator. Bis auf wenige Ausnahmen lag der Windlastschwerpunkt stets zwischen 45 und 75% der Baumhöhe. Dies ist für die Positionierung von Kronensicherungen von Interesse. Demnach wird die üblicherweise empfohlene Regel, auf 2/3 der Länge des zu sichernden Baumteils einzubauen, durch diese Betrachtung bestätigt Für Grundzwiesel wäre jedoch manchmal auch eine etwas niedrigere Einbauhöhe möglich.

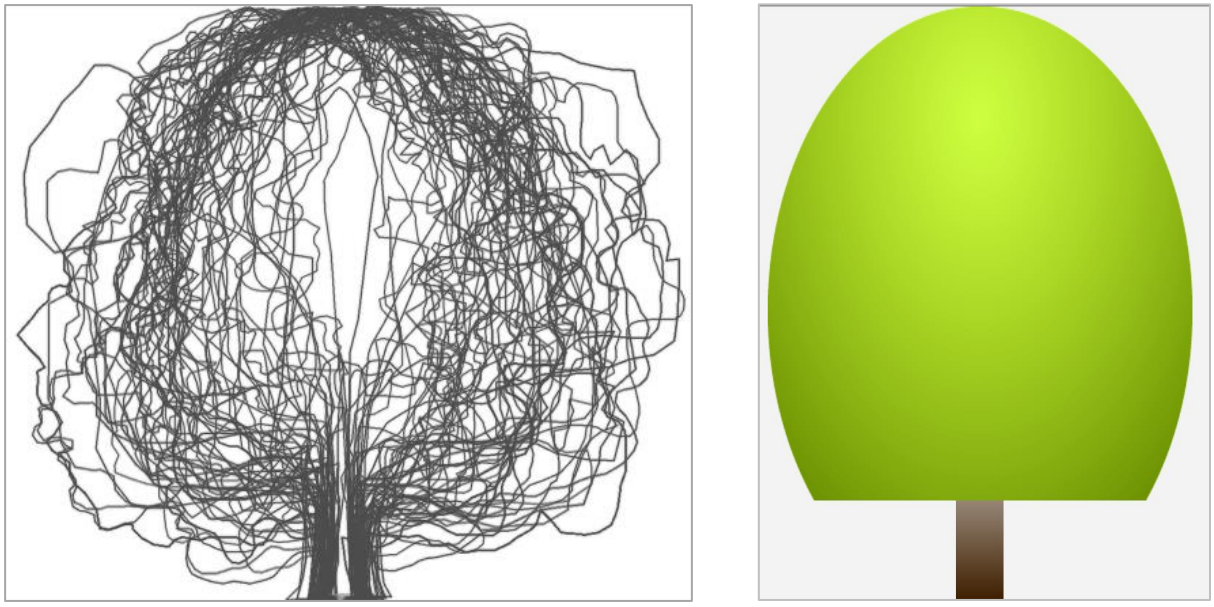


- Abb. 4: Position des Windlastschwerpunkts bei ca. 850 Bäumen, der im Mittel bei etwa 60% der Baumhöhe liegt (durchgezogene Linie). Der Trend (gepunktete Linie) folgt am besten einer Exponentialfunktion, die aber nahezu linear verläuft (Exponent 1,0172 statt 1).

4.2 Kronenformen

Ebenfalls aus Windlastabschätzungen lassen sich Kronenformen ableiten, die für bestimmte Baumarten besonders häufig vorzufinden sind. Da es sich bei den untersuchten Bäumen vor allem um ausgewachsene Bäume oder sogar Altbäume handelt, sind diese Modelle für Managementüberlegungen zum Raumbedarf ebenso interessant wie für Fragen der Kronenüberdeckung

in der urbanen Forstwissenschaft. Für die Baumart Linde ergibt sich aus dieser Betrachtung häufig ein Kronendurchmesser, der etwa zwei Drittel der Baumhöhe entspricht, wobei der Kronenansatz bei etwa einem Sechstel der Baumhöhe lag.



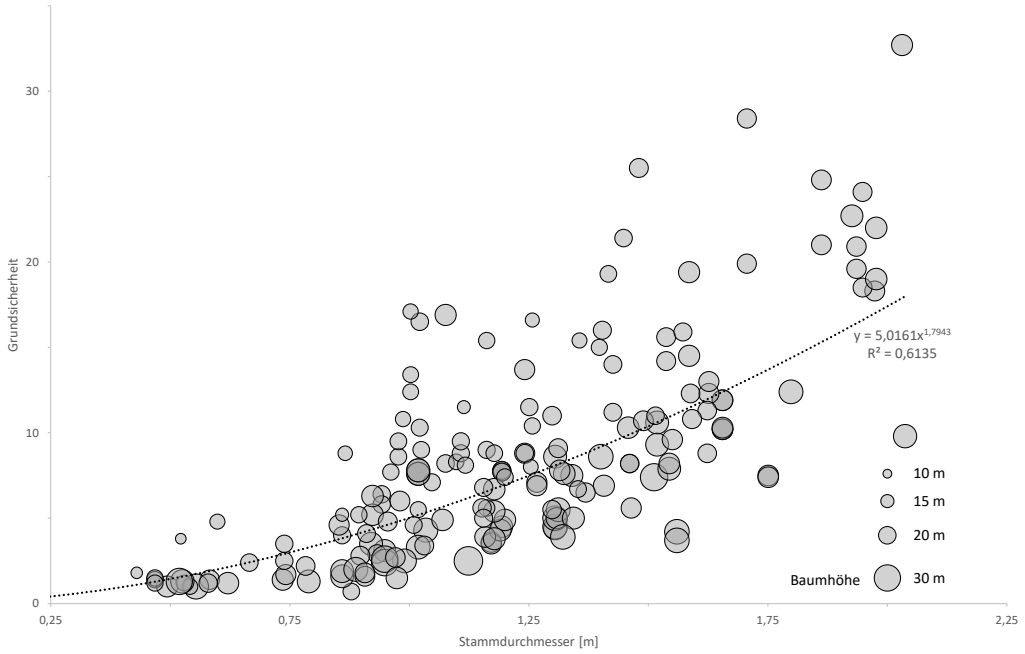
- Abb. 5: Kronenformen Baumart Linde, links 60 individuelle Kronenformen überlagert, rechts entsprechende Standardkronenform aus Treecalc.com.

4.3 Grundsicherheit

Für die Baumart Eiche wurden die Daten der Windlastanalyse dazu verwendet, den Anstieg der Grundsicherheit mit dem Stammdurchmesser abzubilden. Die statische Grundsicherheit wird nach Wessolly & Erb (2014) anhand von zwei Faktoren ermittelt: Zum einen anhand der Widerstandskraft, die ein ungeschädigter Baumstamm gegenüber einer Biegebelastung mindestens erreichen kann, ohne den Punkt des Primärversagens (vgl. Detter & Rust 2015) zu überschreiten. Diese Belastbarkeitsgrenze errechnet sich aus dem gemessenen Durchmesser des Stammes sowie den mechanischen Eigenschaften des grünen Stammholzes (Proportionalitätsgrenze unter Biegung bzw. Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung), die Materialkatalogen entnommen werden können. Zum anderen wird der Winddruck auf die Krone eines Baumes berücksichtigt, der unter Beachtung des Windprofils, der Luftdichte, des c_w-Wertes der Baumkrone und der Rauigkeit des umgebenden Geländes nach den Ansätzen des Eurocode 1 (DIN EN 1991-1-4) errechnet wird. Zur Bemessung wird ein 50-jährliches Sturmereignis herangezogen, bei dem über der freien Landschaft in Böen mind. die Windstärke 12 (117 km/h) erreicht wird, teils sogar über 130 km/h.

Der Datensatz enthält über 150 Auswertungen, die auf exakten Messungen von Baumhöhe, Kronenform und Stammdurchmesser beruhen. Auf diese Weise ist eine Analyse möglich, wie die statische Grundsicherheit einer Eiche mit zunehmendem Stammdurchmesser größer wird. Der Zusammenhang folgt nicht nur der Erhöhung des geometrischen Widerstandsmoments (Koizumi & Hirai 2006), die mit der 3. Potenz des Durchmessers erfolgen müsste. Im Gegenzug steigen mit Baumhöhe und Kronenfläche auch die geschätzten Windbelastungen im Sturm an,

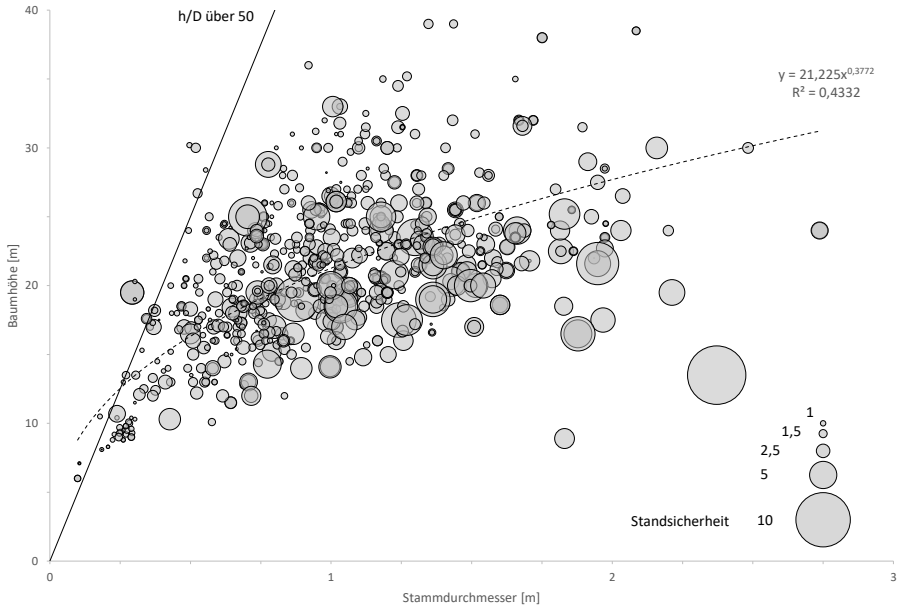
so dass die Zunahme der Grundsicherheit lediglich mit weniger als dem Quadrat des Stammdurchmessers erfolgt. Da die Bäume zwar ihr Höhenwachstum in der Alterungsphase weitgehend einstellen, der Stamm aber immer dicker wird, steigt die Grundsicherheit im Laufe der Entwicklung folglich immer weiter an. Dem stehen mit zunehmendem Alter oft stärker ausgeprägte und umfassendere Schäden am Holzkörper entgegen, so dass die errechnete Stand- und Bruchsicherheit der Bäume meist deuutlich geringer ausfällt.



- Abb. 6: Die Grundsicherheit der Baumart Eiche steigt exponential mit zunehmendem Stammdurchmesser. Der Zusammenhang ist mir $R^2 > 0,6$ vergleichsweise stark. Der Kreisdurchmesser für jeden Datenpunkt entspricht der Baumhöhe

Ein weiterer Formparameter, der aus den vorhandenen Daten abgeleitet wurde, ist das Verhältnis zwischen Baumhöhe und Stammdurchmesser. Hierfür wurden über 850 Bäume ausgewertet, wobei auch die im Zugversuch gemessene Standsicherheit einbezogen wurde. Nach Auffassung mancher Autoren ist das sog. h/D-Verhältnis ein sinnvolles Kriterium zur Beurteilung der Standsicherheit ungeschädigter Bäume (Mattheck et al. 2001), was von anderen Fachleuten bestritten wird (Gruber 2007). Aus unseren Daten wird deutlich, dass nur sehr wenige Eichen ein h/D-Verhältnis von über 50 aufweisen, das als Grenzwert für erhöhte Kippgefahr angeführt wurde. Für diese ist jedoch kein Zusammenhang mit der gemessenen Standsicherheit ersichtlich. Demnach lässt sich dieses Kriterium für die untersuchten Eichen nicht sinnvoll einsetzen.

In unseren Daten steigt die Baumhöhe etwa mit der 3. Wurzel des Stammdurchmessers an, wobei lediglich 43% der Streuung in der Höhe über diesen Zusammenhang erklärt werden kann. Demnach müssen für die Verteilung der Baumhöhen in der untersuchten Stichprobe auch noch andere Parameter als der Stammdurchmesser von wesentlicher Bedeutung sein.



- Abb. 7: Verhältnis von Baumhöhe zu Stammdurchmesser, nur sehr wenige Bäume weisen ein h/D-Verhältnis von 50 und mehr auf (durchgezogene Linie). Der Kreisdurchmesser entspricht der aus einem baumstatischen Zugversuch errechneten Standsicherheit

5 Bruchsicherheit des Stammes

5.1 Bruchverhalten von Holz

Wenn ein Baum sich mit dem Wind biegt, entstehen auf der windzugewandten Seite des Stammes Zugspannungen, die eine Dehnung des Holzes bewirken. Auf der gegenüberliegenden, windabgewandten Seite wird der Holzkörper aufgrund von Druckspannungen gestaucht. Eine zu hohe Windbelastung führt dazu, dass zunächst die Holzfasern auf der Druckseite versagen, da die Druckfestigkeit des Holzes nur halb so hoch ist wie seine Zugfestigkeit (Kollmann 1951, Bodig & Jayne 1982, Niemz 1993, Winandy 1994, Natterer et al. 2000). Dieses Ereignis wird als Primärversagen bezeichnet.

Durch das sukzessive Nachgeben der Druckseite verändert sich auch das Verhältnis von einwirkender Last und erreichter Stammbiegung: die Krümmung nimmt bei gleichmäßig ansteigender Belastung ab diesem Punkt stärker zu (Detter & Rust 2013). Daher spricht man von der Proportionalitätsgrenze der Verformung. In der Mechanik wird er als Überschreiten des Hook´schen Bereichs definiert, wobei der Stamm den elastischen Bereich der Biegung verlässt und im Material viskoelastische und später plastische Verformungen auftreten. In der Folge steigen die Spannungen auf der Zugseite immer weiter an, bis auch dort die Belastbarkeitsgrenze erreicht wird und der Stamm – hörbar und sichtbar – versagt und bricht (Niklas & Spatz 2012).

5.2 Druckversagen

Erreicht die Windeinwirkung zwar die Primärversagensgrenze, aber nicht die zum endgültigen Versagen erforderliche Last, können Bäume das entsprechende Sturmereignis überstehen, ohne abzubrechen. Dabei entstehen plastische Verformungen der Randfasern, die meist jedoch nur

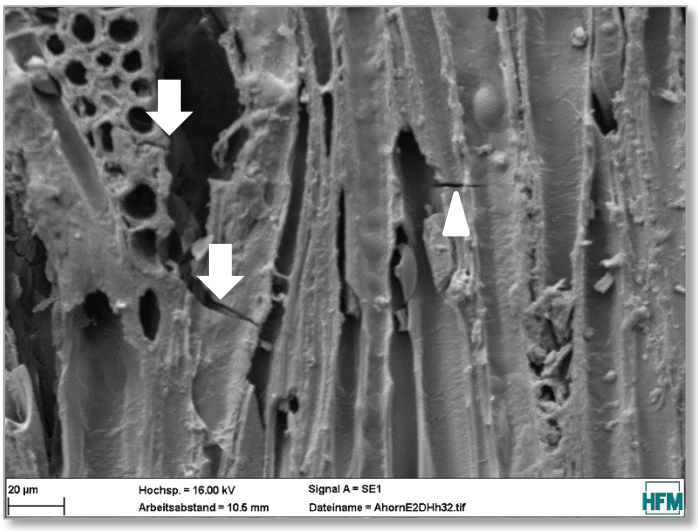
mikroskopisch erkennbar sind. Bei einer 100-fachen Vergrößerung ist im Längsschnitt ein Ausknicken der Fasern in tangentialer Richtung erkennbar. Die Stauchungszone verläuft in einem Winkel von etwa 60 bis 70° zur Faserrichtung und erstreckt sich über Holzfasern, großlumige Gefäße sowie Holzstrahlgewebe (Abb. 8). In diesem Bereich knicken die Zellwandstrukturen der Holzfasern und Gefäße seitlich aus. In diesem Bereich knicken die Zellwandstrukturen der Holzfasern und Gefäße seitlich aus. Dies ist auch in der Forst-/Holznutzung ein wichtiges Thema, dort als Faserstauchung und Faserbruch bezeichnet (RICHTER 2010).

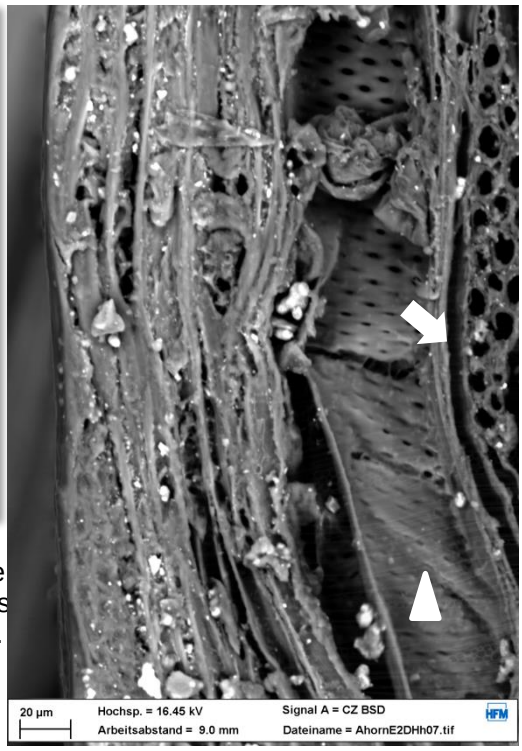
- Abb. 8: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Stauchungszone, Verlauf von oben links nach Mitte rechts; Tangentialschnitt. M. Risse, Holzforschung München

Mit Hilfe eines Elektronen-Rastermikroskops sind zusätzlich folgende Versagensformen in der Holzstruktur erkennbar:

- Axiale und transversale Rissbildung in den Holzstrahlen und der S_2-Schicht der Faserzellwände (Abb. 9)
- Auffalten der Gefässwände (Abb. 10).

Diese irreversiblen Veränderungen der holzanatomischen Struktur entstehen, wenn die tragenden Elemente innerhalb des geschlossenen Holzkörpers beim Primärversagen seitlich weggleiten. Dabei bilden sich in den mehrreihigen Holzstrahlen durch Rissbildung an Zellenwänden große Zwischenräume, weil die Holzfasern im Bereich der Holzstrahlen infolge der seitlichen Verschiebung aufspreizen. Die Überwindung der Drucksteifigkeit der aus den Holzfasern gebildeten Gitterstruktur kann das seitliche Ausknicken einleiten (vgl. Gibson 2005). Da die Querzugsfestigkeit der Holzstrahlen vermutlich gering ist, wäre ihr Versagen ähnlich zu beurteilen wie das spiralige Auffalten und seitliche Einknicken der dünnen Wände großlumiger Frühholzgefäße. Diese tragen zwar wenig zur Festigkeit des Holzes bei, werden aber dennoch besonders stark verformt, wenn der Versagensprozess einsetzt.





- Abb. 9 (links) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme. Rissbildung am Ende eines Holzstrahls (Blockpfeile) und durch eine Holzfaser (Spitzpfeil). Tangentialschnitt.

- Abb. 10 (rechts) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Auffalten der dünnen Wand eines Frühholzgefäßes in der Knickzone (Spitzpfeil) und Delamination der Holzstahlwand (Blockpfeil). Tangentialschnitt. REM-Aufnahmen: M. Risse, Holzforschung München

5.3 Wulstholzbildung nach Primärversagen

Nach der Faserstauchung bildet der Baum in den geschädigten Bereichen Wulstholz. Dieses ist in der Praxis nicht problemlos zu erkennen, denn solche Knickleisten (Arnold 2003) als Resultat eines Primärversagens lassen sich nur schwer von anderen Formen der Wulstbildung unterscheiden. Für die lokale Bildung von Wucherungen oder Gewebewülsten können rein anatomische Gründe verantwortlich sein, so z.B. schlafende Knospen bei Eiche oder Linde. Vielfach als Stauchungen angesprochene Erscheinungen sind arttypisch und kein Hinweis auf Defekte im Holzkörper (vgl. Dujesiefken et al. 2005). Nachweislich kann auch das Phytohormon Ethylen Veränderungen in der Holzanatomie hervorrufen und – in hohen Konzentrationen – zur Bildung ungewöhnlicher Strukturen im Xylem führen (Nelson & Hillis 1978). Gewebefaltungen können auf der Unterseite von Astansätzen oder am Stammfuß auch aus rein geometrischen Gründen auftreten, wenn sich konkav gekrümmte Randbereiche des Holzkörpers (Astanbindung bzw. Wurzelanlauf) verstärken. Infolge des Platzmangels können sich hier ebenfalls Faltungen der Rinde und des Xylems bilden (vgl. Kap. 3).

Aus der Praxis der Baumdiagnose liegen nach unserer Kenntnis bislang keine Nachweise für eine verminderte Bruchsicherheit im Bereich von Wulstholz vor. Das Schadpotenzial streifenartiger Knickzonen, die sich nach einem Primärversagen ausbilden, wird als gering eingestuft, da sie eine Kompensation des Schadens anzeigen (Mattheck & Breloer 1994, Wessolly & Erb 2014). Der endgültige Bruch von Fichtenholz mit Knickzonen erfolgt zwar spröder (Arnold & Steiger 2007), in der Natur findet er aber gar nicht immer in den Stauchungszonen statt (Mergen

1954). Insofern hat Wulstholzbildung keine besondere Bedeutung bei der visuellen Untersuchung der Verkehrssicherheit.

5.4 Kambiale Brücken

Bei erfolgreicher Kompensation von Schäden und zunehmenden Belastungen entwickeln sich bei sehr alten Bäumen vielfach Streifen starken Dickenwachstums, die als kambiale Brücken bezeichnet werden (Fay 2015). Sie reichen von der Unterseite der kronenbildenden Starkäste über den durch Einwallungen strukturierten Stamm bis zu den Wurzelanläufen.

- Abb. 11 kambiale Brücken von der Astunterseite einer alten Linde (ND Tannerlkapelle, Lkr. Cham) über den von Einwallungen durchzogenen Stamm bis zu den Wurzelanläufen

Weil sie durch ihr starkes Wachstum zugleich am weitesten von der Stammachse entfernt sind, tragen kambiale Brücken wesentlich zur Lastabtragung bei. In Zugversuchen treten hier regelmäßig die größten Faserdehnungen oder –stauchungen auf. Vielfach drückt sich auch die vorherrschende Windrichtung in der Position der kambialen Brücken am Stamm aus. Sie sind daher ein wichtiges Indiz für die Wuchsleistung des Baumes und seine Fähigkeit, trotz teils erheblicher Vorschäden seine Bruchsicherheit aufrecht zu erhalten.

5.5 Wundholz

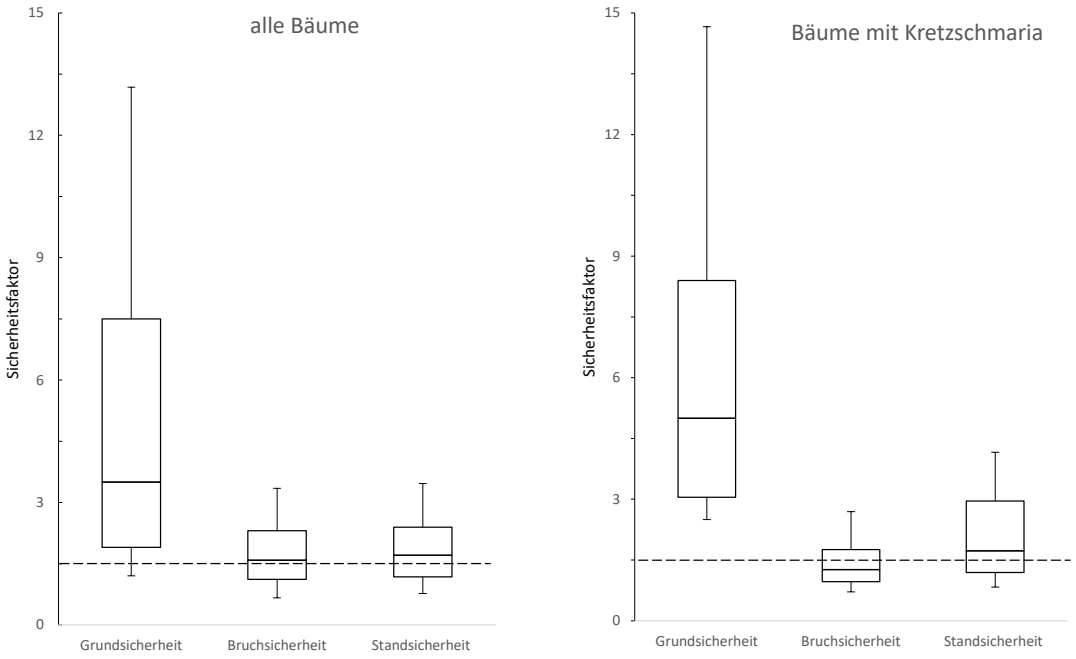
Primär wird Wundholz gebildet, um Öffnungen des Holzkörpers, die Eintrittspforten für holzbewohnende Pilze darstellen können, wieder zu verschließen und so die Abschottungsreaktion des Baumes zu vervollständigen (Shigo 1991, Dujesiefken & Liese 2008). In Zugversuchen zeigt sich aber oft, dass die Wundholzstränge auch eine wichtige Funktion zum statischen Ausgleich der Schwächung erfüllen, die durch den Verlust an Holzsubstanz und die Öffnung des Holzkörpers entsteht. Risse in einem abgestorbenen freiliegenden Holzkörper sind daher wenig bedeutsam, solange das umgebende Wundholz intakt ist.

Oftmals breitet sich eine Fäule jedoch außerhalb des Wundbereichs bis in den lebenden Splint aus, so dass dort sehr dünne und versagensgefährdete Wandstärken entstehen können, während der Wundrand viel belastbarer ist. Nach einem Bruchversagen bleibt in solchen Fällen oft nur noch das Wundholz bestehen. Dabei unterscheiden sich die Baumarten hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ihres Wundholzes. Während die Baumart Linde oft vergleichsweise nachgiebiges Wundgewebe produziert, ist das Überwallungsgewebe bei Rosskastanien meist deutlich härter und starrer als reguläres Holz.

- Abb. 12 Schwundrisse im abgestorbenen Holz, die ohne äußere Einwirkung entstanden sind. Das Wundgewebe ist erst bei außergewöhnlich hoher Windeinwirkung gerissen.

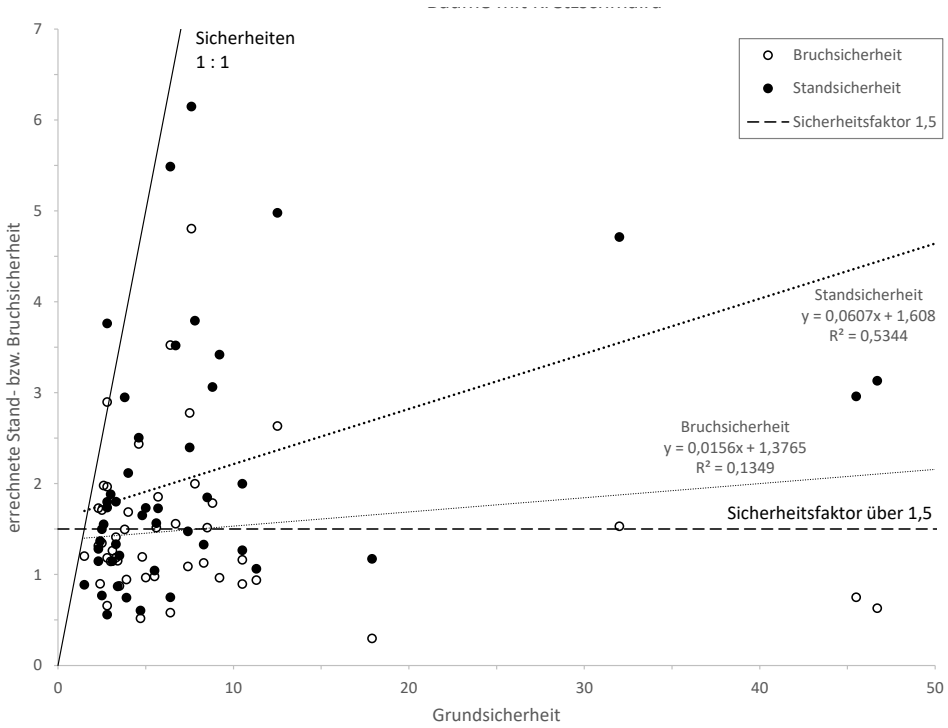
5.6 Pilzbefall

Durch Zugversuche werden regelmäßig die Auswirkungen von Pilzbefall auf die Bruchsicherheit von Altbäumen untersucht. Dabei zeigt sich deutlich, dass nicht allein der Schaderreger, sondern ganz wesentlich die Grundsicherheit des Baumes und seine Kompensationsleistung ausschlaggebend für die Beurteilung der Verkehrssicherheit sind. Dennoch wurden für diese Publikation die Ergebnisse von Zugversuchen an über 40 Bäumen ausgewertet, die vom Brandkrustenpilz (mykol. Bez. *Kretzschmaria deusta*) befallen waren. Im Vergleich zu etwa 850 anderen Messungen zeigt sich deutlich, dass insbesondere die Bruchsicherheit durch diesen Erreger stärker vermindert wird als im Durchschnitt. Bei Bäumen, die mit Brandkrustenpilz befallen waren, lag die Bruchsicherheit bei mehr als der Hälfte der Bäume unter dem Sollwert von 1,5, während sie ansonsten bei über 50% ausreichend hoch war.



- Abb. 13 Vergleich der Sicherheitsfaktoren für alle Bäume (links) und Bäume mit Befall durch den Brandkrustenpilz (rechts). Box 50 % aller Werte, Antennen 80 % aller Werte. Die Bruchsicherheit ist bei Bäumen mit Brandkrustenpilz stärker vermindert als bei anderen Bäumen, die Standsicherheit ist demgegenüber ähnlich stark herabgesetzt.

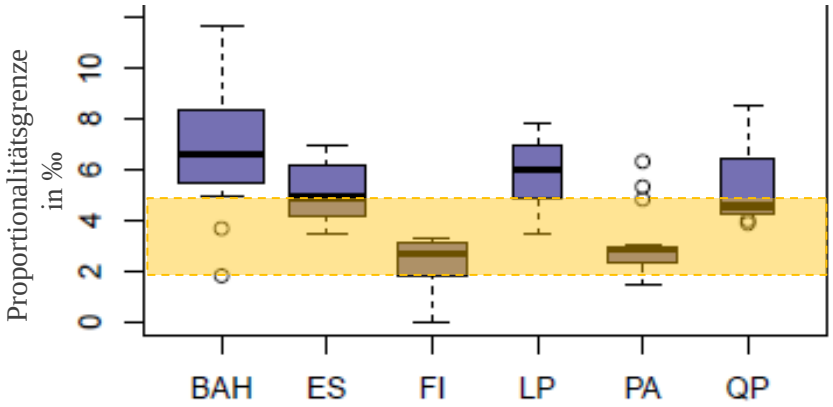
Die Auswirkungen des Befalls zeigen sich auch hinsichtlich der ermittelten Standsicherheit der Bäume. Hier besteht jedoch ein stärkerer Zusammenhang mit der Grundsicherheit des Baumes. Die Streuung der Standsicherheiten aller Bäume mit Brandkrustenpilz ließ sich zu über 50% aus der Grundsicherheit der Bäume erklären. Dies weist darauf hin, dass der Befall durch den Brandkrustenpilz zwar auch die Verankerungskraft der Wurzeln beeinträchtigt, die Standsicherheit aber durch die Grundsicherheit, also den bereits erreichten Stammdurchmesser des Baumes und eine möglicherweise geringe Baumhöhe, stärker beeinflusst wird als die Bruchsicherheit des Baumes. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass dieser Pilz in der Lage ist, tragende Bereiche des Holzkörpers zu durchwachsen und lokal eine Verminderung der Bruchsicherheit zu bewirken. Demgegenüber wird die gesamte Verankerungskraft des Wurzelsystems nicht so drastisch durch lokale Fäulnis herabgesetzt.



- Abb. 14 Analyse der Zusammenhänge zwischen Grundsicherheit und Stand- bzw. Bruchsicherheit von Bäumen mit Befall durch den Brandkrustenpilz. Die Standsicherheit wird je nach Grundsicherheit des Baumes reduziert, während die Bruchsicherheit unabhängig von der Grundsicherheit variieren kann.

5.7 Zuverlässigkeit der Hochrechnung der Bruchsicherheit aus Zugversuchen

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

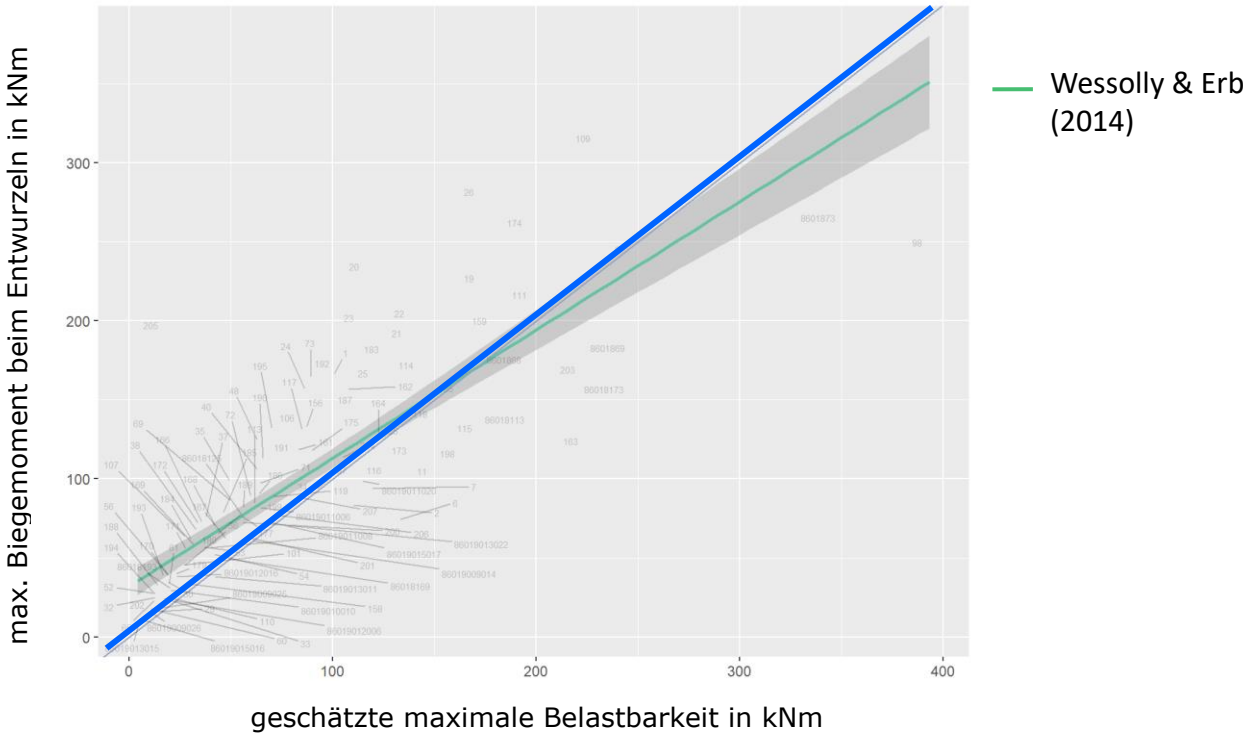


- Abb. 15 Proportionalitätsgrenzen von 78 stehenden Bäumen der Arten Acer pseudoplatanus, Fraxinus excelsior, Picea abies, Platanus acerifolia, Populus canadensis. Der gelb unterlegte Bereich stellt die bei Wessolly & Erb 2014 angegebenen Werte dar.

6 Erkenntnisse zur Standsicherheit

6.1 Zuverlässigkeit der Hochrechnung

Auch hinsichtlich der Standsicherheit wurde die Zugversuchsmethode durch wissenschaftliche Versuche an über 150 Bäumen überprüft. Dabei haben wir festgestellt, dass die im Zugversuch zur Hochrechnung verwendete Belastung bei 0,25° Stammfußneigung ein sehr guter Indikator für die maximale Belastbarkeit des Wurzelsystems darstellt. Wiederum wird die tatsächliche Widerstandskraft meist unterschätzt, als sichere Hochrechnung, bei der unsichere Bäume mit großer Gewissheit erfasst werden, ist dieser Ansatz jedoch sehr gut geeignet (vgl. Detter & Rust 2013, Detter et al. 2019)



- Abb. 16 aus Zugversuchen geschätzte Belastbarkeit des Wurzelsystems nach Wessolly & Erb (2014) und gemessene tatsächliche Widerstandskraft der Verankerung

6.2 Eingriffe in den Wurzelbereich

6.2.1 Entfernen von Einbauten und Auflasten

Auch wenn der stammnahe Wurzelraum nur durch die Entfernung von Einbauten verändert wird, kann die Standsicherheit vermindert werden, wenn diese als Widerlager für Verankerungswurzeln dienten. Hierzu liegen Ergebnisse vor, die zwar einen signifikanten Zusammenhang mit dem Eingriff, aber nur eine geringe Reduktion der Verankerungskraft um etwa 7% zeigen (Schüller 2016). Die Auswirkungen von Auflasten im stammnahen Wurzelbereich bzw. deren Entfernung wurden zwar experimentell bereits nachvollzogen (Prosenz 2012), quantitative Studien fehlen jedoch bislang nach unserer Kenntnis.

6.2.2 Abgrabungen

Klarer nachvollziehbar und besser untersucht sind die Auswirkungen von Abgrabungen und Wurzelkappungen im stammnahen Erdkörper. Nach verbreiteter Auffassung ist die Verminderung der Verankerungskraft vom Abstand der Grabungen zum Stamm abhängig. Nur in zwei wissenschaftlichen Versuchsreihen wurde bei Eingriffen außerhalb des statisch wirksamen Wurzelraumes (Abstand über 1,5-facher Stammdurchmesser nach Wessolly & Erb 2014) eine signifikante Verminderung der Standsicherheit gemessen (Smiley 2008, Fini et al. 2012). Ansonsten war bislang keine statistisch signifikante Reduktion der Belastbarkeit des Wurzelsystems erkennbar, wenn der Abstand der Grabung mehr als das Doppelte des Stammdurchmessers betrug (Smiley 2012, Ghani et al. 2009). Da diese Versuche an Gehölzen mit weniger als 20 cm Stammdurchmesser erfolgten, verbleiben gewisse Zweifel bei einer Übertragung auf Großbäume.

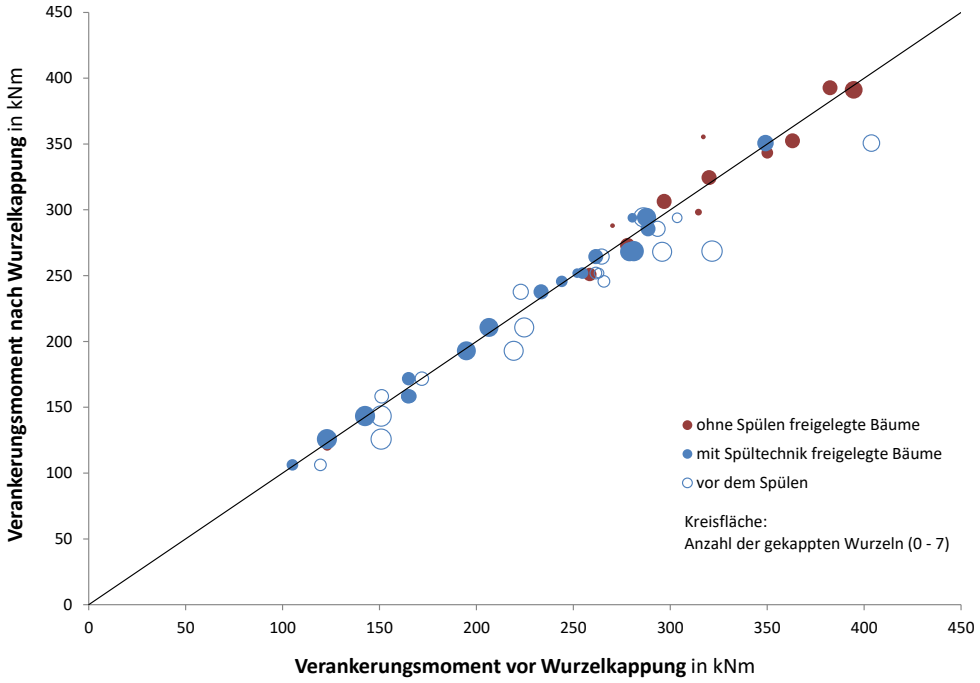
Auch einzelne Versuche mit Altbäumen (Bader 2000) legen den Schluss nahe, dass erst durch stammnahe Eingriffe in den Wurzelbereich die maximale Belastbarkeit des Wurzelsystems maßgeblich vermindert wird. Die Durchtrennung weiter entfernter Wurzeln wirkt sich nicht so gravierend auf die Mechanik des Baumes aus, weil zunächst vor allem die Widerstandskraft der stammnahen Wurzeln überwunden werden muss, bevor die weiter entfernten Teile des Wurzelsystems ihre volle Wirkung entfalten können. Dies darf aber nicht dazu führen, Eingriffe in den zu schützenden Wurzelbereich zu bagatellisieren, da ihre destabilisierende Wirkung häufig erst verzögert infolge von Wurzelfäulen eintritt. Für die Beurteilung der Standsicherheit nach Eingriffen sind diese Erkenntnisse aber sehr wohl zum Erhalt wertvoller Altbäume einsetzbar.

Bei wissenschaftlichen Versuchen zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Verminderung der Standsicherheit von der Anzahl der stammnah durchtrennten Wurzeln. Waren 50% aller Wurzeln durchtrennt, wurde die Verankerungskraft auf 75 bis 40% des Ausgangswertes vermindert (Smiley et al. 2014). Die Autoren führen diese immer noch vergleichsweise hohe Resttragfähigkeit auf das Vorhandensein tiefreichender Wurzeln zurück.

6.2.3 Auswirkung von Wurzelkappungen bei der Sanierung von Gehwegen

Wenn tiefer liegende Wurzeln verbleiben, sind Wurzeldurchtrennungen offenbar grundsätzlich weniger problematisch (Mickovsik & Ennos 2003). Weil durch oberflächennahe Wurzeln vielfach Pflasterwege und Fahrbahndecken angehoben werden und sie bei der Sanierung solch uneben gewordener Beläge durchtrennt werden müssen, stehen die Verantwortlichen oft vor einem Dilemma. Daher wurden die Auswirkungen von Wurzelkappungen im oberflächennahen Bereich auf die Verankerungskraft von Bäumen in Zusammenarbeit mit der G. Fischer, Stadt Marl, und der Hochschule Weihenstephan untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Standsicherheit von 28 Bäumen vor und nach der Kappung oberflächennaher Wurzeln mittels gleich angelegter Zugversuche gemessen. Zur Freilegung der Wurzeln wurden manuelle Grabungen und teils Spülverfahren eingesetzt. Um den Einfluss der Wasserzugabe beim Spülen zu erfassen, wurde auch nach dem Freilegen der Wurzeln ein Zugversuch durchgeführt.

Das Ergebnis zeigt keinen Einfluss der Wurzelkappungen auf die Standsicherheit der Bäume. Dies liegt vor allem offenbar darin, dass die Bäume in einer tiefer liegenden Bodenschicht zahlreiche statisch wirksame Wurzeln ausgebildet hatten. Die störenden Wurzeln, die zur Erneuerung der Beläge gekappt werden mussten, befanden sich unmittelbar unter der Belagsfläche in maximal 30 cm Tiefe. In vielen Fällen waren keine Wurzeln mit mehr als 2 cm Durchmesser vorhanden, obwohl Belagsflächen verworfen waren. In manchen Fällen waren schon zu einem früheren Zeitpunkt Wurzelkappungen durchgeführt worden.



- Abb. 17 geschätzte Belastbarkeit der Verankerung vor und nach oberflächennahen Wurzelkappungen. Entlang der durchgezogenen Linie ist die Belastbarkeit etwa gleich, d.h. die Verankerungskraft wurde beim Eingriff nicht vermindert. Die ausgefüllten Punkte wurden nach dem Spülen ermittelt.

Das Freispülen der Wurzeln verursachte eine deutliche, aber nur geringfügige Veränderung der Kippsteifigkeit des Wurzelsystems. Dieser Effekt der Wasserzufuhr wurde in anderen Arbeiten (Wohn 2003, Rust et al. 2013) bereits dargestellt, daraus entstehen aber keine wesentlichen Einschränkungen für den praktischen Einsatz von Zugversuchen.

Die oberflächennahen Wurzeln hatten bei den untersuchten Bäumen offenbar keine maßgebliche Bedeutung für die Verankerungskraft. Ähnliche Ergebnisse erbrachten auch zahlreiche andere Zugversuche an Großbäumen, deren oberflächennahe Wurzeln gekappt worden waren. Teils handelte es sich um massive Starkwurzeln, durch deren Entfernung Schnittflächen von mehr als 20 cm unmittelbar am Stammfuß entstanden waren. Dies ist natürlich kein Freibrief für baumschädigendes und regelwidriges Handeln, sondern eröffnet zumindest die Möglichkeit, so stark beschädigte Bäume eventuell dennoch durch eingehende Untersuchungen so lange erhalten zu können, bis sich zeigt, ob sie physiologisch den Eingriff überstehen und den kaum zu vermeidenden mykologischen Angriff der holzzerstörenden Pilze abwehren können.

6.3 schräg stehende Bäume

6.3.1 angekippte Bäume

Wenn nach einem Sturmereignis Bäume stark schräg stehend zurück bleiben, muss davon ausgegangen werden, dass sie erhöht umsturzgefährdet sind. Die Belastbarkeit ihres Wurzelsystems wird deutlich vermindert, wenn es über seine maximale Widerstandskraft hinaus verformt wird. Das haben Messungen an vorsätzlich überlasteten Bäumen gezeigt (vgl. Detter et al. 2019), bei denen nach dem Ende eines Zugversuchs mindestens 2 ° Neigung am Stammfuß verblieb. 2 von 8 Bäumen kippten innerhalb von 3 Jahren um, ein weiterer war nach Ablauf von 8 Jahren umgestürzt. Bei diesem Baum war aber in einem Zugversuch nach 3 Jahren die verminderte Standsicherheit deutlich erkennbar.

Ein Baum, der anders als die zuletzt genannten nur soweit belastet wurde, dass am Ende des Zugversuchs nur 0,25° Neigung verblieb, zeigte nach 3 Jahren nur eine um 10% verminderte Standsicherheit. Nach 5 weiteren Jahren war er bereits besser verankert als vor der Überlastung. Auch vier andere überlastete Bäume konnten ihre zuvor auf teils weniger als 50% reduzierte Stabilität innerhalb von 8 Jahren wieder auf 75 bis 85% erhöhen.

6.3.2 Anzeichen der Stabilisierung

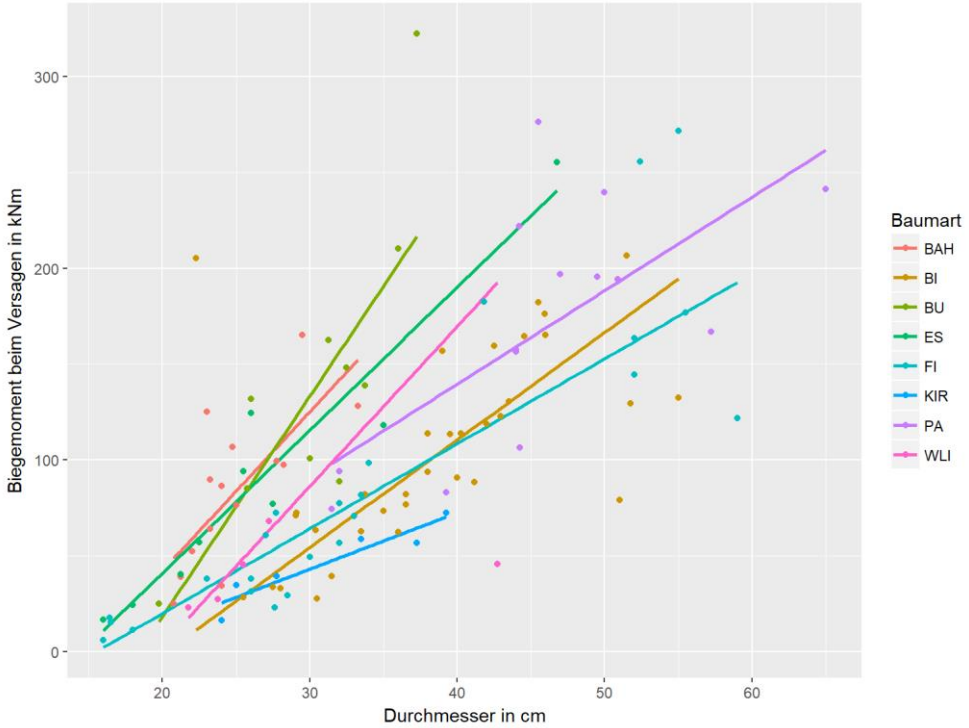
Die Bildung von Stützholz auf der Unterseite des geneigten Stammes und auf der Druckseite des Stammfußes wurde oben bereits als wichtiger Hinweis auf eine erfolgreiche Stabilisierung angeführt. Darüber hinaus kann sich der Leittrieb durch Bildung von Zug- oder Druckholz wieder entgegen der Gravitation in die Senkrechte aufrichten. In diesem Fall zeigt sich ein abruptes Abknicken der Wuchsrichtung. In der Fachliteratur wird davon ausgegangen, dass die Änderung der Wuchsrichtung durch die inneren Spannungen nur bis zu einem Durchmesser von 10 cm möglich ist (Fobo & Blum 1985, Coutant et al. 2007).

Knickt also der Leittrieb ab und wächst wieder senkrecht nach oben, ist zumindest ausgeschlossen, dass das Kippversagen erst vor kurzem erfolgt ist. Betrachtet man den Durchmesser an der entstandenen Knickstelle, sind über typische Zuwachsraten gewisse Rückschlüsse auf den mindestens seit dem Kippen vergangenen Zeitraum möglich. Bei vitalen Bäumen wäre innerhalb von 10 Jahren nach einem Eingriff eine erfolgreiche Akklimation durch Zuwachs und Wurzelneubildung zu erwarten (Detter & Rust 2018).

Falls nicht auszuschließen ist, dass der Baum langsam absinkt, z.B. wenn er säbelförmigen Wuchs statt eines abrupten Knicks im Leittrieb zeigt, wäre auch eine Überwachung der Stammneigung mit einer digitalen Wasserwaage möglich. Diese wird zur Prüfung regelmäßig auf zwei fest ins Splintholz gesetzten Nägeln platziert. Treten lediglich zyklische Schwankungen auf, die den Jahreszeiten (belaubt/unbelaubt) oder verschiedenen Witterungsereignissen (nasse/trockene Krone, Schneeauflage) zugeordnet werden können, lässt sich ein Absinken ohne großen technischen Aufwand ausschließen. In unserer gutachterlichen Praxis sind dabei noch nie gerichtete Neigungsänderungen aufgetreten, die ein Absinken nachgewiesen hätten.

6.4 Unterschiede zwischen Baumarten

Die Verankerung wird von verschiedenen Baumarten unterschiedlich stabil ausgebildet. Die Untersuchungen zur Standsicherheit von Bäumen erlauben einen Vergleich der maximalen Verankerungskraft zwischen Bäumen anderer Arten, aber gleichen Stammdurchmessers. Demnach sind Berg-Ahorne, Rot-Buchen und Eschen tendenziell kräftiger verankert, während die Wurzelsysteme von Rot-Fichte, Birke und Vogel-Kirsche bei gleichem Durchmesser weniger belastbar sind.



- Abb. 18 gemessene Belastbarkeit der Verankerung verschiedener Baumarten nach Stammdurchmesser in 1 m Höhe. Ergebnisse von Belastungstests bis zum Entwurzeln

Die Frage nach der Standsicherheit von Bäumen nach maßgeblichen Eingriffen in den Wurzelbereich oder bei ausgeprägten Schadsymptomen lässt sich aber in aller Regel nur durch baumstatische Zugversuche rasch und zuverlässig klären. Hier liegt ein wichtiges Einsatzgebiet für diese Methode.

7 Literatur

Arnold, M., 2003. Compression Failures in Wind-damaged Spruce Trees, in: Proceedings of the International Conference Wind Effects on Trees, Karlsruhe, p. 253—260.

Arnold, M., Steiger, R. (2007). The influence of wind-induced compression failures on the mechanical properties of spruce structural timber. Materials and Structures 40:57-68.

Bodig, J., Jayne, B.A., 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York.

Coutand, C., Fournier, M. & Moulia, B. (2007). The gravitropic response of poplar trunks: key roles of prestressed wood regulation and the relative kinetics of cambial growth versus wood maturation. Plant physiology, 144(2), pp.1166–80.

Detter, A., Brudi, E., & Bischoff, F. (2010). Messverfahren und Bewertungsmethoden zur Verkehrssicherheit. AFZ-DerWald, (8), 34–35.

Detter, A., Richter, K., Rust, C., & Rust, S. (2015). Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz. In Jahrbuch der Baumpflege 2015 (S. 156–167).

Detter, A. & Rust, S. (2013). Aktuelle Untersuchungsergebnisse zu Zugversuchen. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.) Jahrbuch der Baumpflege 2013, Haymarket Media

Detter, A., & Rust, S. (2018). Grundlagen und Kriterien zur visuellen Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen. In Jahrbuch der Baumpflege 2018 (S. 145–160). Haymarket Media GmbH & Co. KG.

Detter, A., Rust, S., Rust, C., & Maybaum, G. (2014). Determining strength limits for standing tree stems from bending tests. In 18th international nondestructive testing and evaluation of wood symposium. Madison, USA: U.S. Department of Agriculture , Forest Service, Forest Products Laboratory.

Detter, A., Wassenaer, P.v., Rust, S. (2019) Erholung der Verankerung nach Entwurzelung. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.) Jahrbuch der Baumpflege 2019, Haymarket Media (im Druck)

DIN EN 1991-1-4 Norm, 2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten; Deutsche Fassung

Dujesiefken, D.; Jaskula, P.; Kowol, T.; Wohlers, A., 2005. Baumkontrolle unter Berücksichtigung der Baumart. Thalacker Medien, 296 S.

Dujesiefken, D., & Liese, W. (2008). Das CODIT-Prinzip: von den Bäumen lernen ; für eine fachgerechte Baumpflege. Braunschweig: Haymarket Media.

Ennos, A.R., 1995. Development of buttresses in rainforest trees: the influence of me-chanical stress. In: Coutts, M.P., Grace, J.C. (Eds.). Wind and trees. 293—301.

Fay, N. (2015). Der richtige Umgang mit uralten Bäumen: Archebäume und Baumveteranen. In Jahrbuch der Baumpflege (Bd. 2015, S. 181–197). Braunschweig: Haymarket Media GmbH & Co. KG.

Fini, A., Ferrini, F., Frangi, P., Piatti, R., Amoroso, G. (2012). Effects of root severance by excavation on growth, physiology and uprooting resistance of two urban tree species. In: II International Symposium on Woody Ornamentals of the Temperate Zone 990. 2012. S. 487-494.

Fobo, R., & Blum, W. (1985). Über die Mechanik des Druckholzes. arcus, (4).

Ghani, M. A., Stokes, A., & Fourcaud, T. (2009). The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (Eugenia grandis Wight). Trees, 23(2), 197–209.

Gibson Lorna J., 2005. Biomechanics of cellular solids. Journal of Biomechanics 38, 377–399.

Gruber, F.: Die wissenschaftlich nicht nachvollziehbare VTA-h/D=50-Grenzkonstante, ein kaum brauchbares, nicht justitiables Verkehrssicherheitskriterium. Agrar- und Umweltrecht, 8/2007 c, S. 267 ff.

Kane, B. & Clouston P. (2008). Tree Pulling Tests of Large Shade Trees in the Genus Acer. Urban Forestry & Urban Greening 34 (2), 101–109.

Koizumi, A., & Hirai, T. (2006). Evaluation of section modulus for tree-stem cross sections of irregular shape. Journal of Wood Science, 52(3).

Kollmann, F. 1951. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage. Springer Verlag.

Larjavaara, M., Muller-Landau, H. C., 2010. Rethinking the value of high wood density. Functional Ecology 24, 701–705.

Mattheck, C., Breloer, H., 1994. Handbuch der Schadenskunde von Bäumen, Rombach Wissenschaft;Reihe Ökologie. Rombach, Freiburg im Breisgau.

Mattheck, C., Bethge, K., Tesari, I., Kappel, R., & Gmbh, F. K. (2001). Ein neues Versagenskriterium für nicht fäulegeschädigte solitäre Bäume (wissenschaftliche Berichte No. FZKA 6666) (S. 16). Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.

Mergen, Francois, 1954. Mechanical aspects of wind-breakage and windfirmness. Journal of Forestry 52, 119–125.
Mickovski, S. B., & Ennos, R. (2003). Anchorage and Asymmetry in the Root System of Pinus peuce. Silva Fennica, 37(2), S. 161–173.
Natterer, J., Sandoz, J.L., Martial, R., 2000. Construction en bois, Traité de Génie Civil. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland.
Nelson N. D., Hillis W. E. 1978. Ethylene and Tension Wood Formation in Eucalyptus gomphocephala. Wood Science and Technology 12: 309-315
Niemz, P., 1993. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Holz. DRW-Verl, Leinfelden-Echterdingen.
Niklas, K.J., Spatz, H.-C., 2012. Plant Physics. The University of Chicago Press, Chicago.
Reinartz, H. & Schlag, M. (2006). Visuelle Baumkontrolle. Wertermittlungsforum, 24(1), 8—12.
Richter, C. (2010): Holzmerkmale. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden (S. 169-172).
Rust, S., & Weihs, U. (2007). Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung (S. 215—241).
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.
Schüller, C. (2016). Das Widerlager an Baumwurzeln und sein Einfluss auf die Baumstatik (Masterarbeit). Fachhochschule Erfurt.
Shigo, A. (1991): A New Tree Biology. Shigo and Tree Associates, Durham, NH., USA.
Smiley, E.T. (2008): Root Pruning and Stability of Young Willow Oak. Arboriculture & Urban Forestry 34 (2): 123–128.
Smiley, E.T. (2012). The Likelihood of Tree Failure from Root Cuts or Damaged Sapwood. Vortrag am 24.09.2012, ISA Tree Biomechanics Symposium, Morton Arboretum, Lisle, Il.
Smiley, E. T., Holmes, L., & Fraedrich, B. R. (2014). Pruning of Buttress Roots and Stability Changes of Red Maple (Acer rubrum). Arboriculture & Urban Forestry, 40(4), S. 230–236.
Sonderegger, W., Niemz, P., 2004. The influence of compression failure on the bending, impact bending and tensile strength of spruce wood and the evaluation of non-destructive methods for early detection. Holz als Roh- und Werkstoff 62, 335–342.
Wessolly, L., 1991. Verfahren zur Bestimmung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. Holz als Roh- und Werkstoff 49, 99–104.
Wessolly, L. (2010). 25 Jahre Baumstatik – eine Bilanz. Pro Baum 3, 12-15.
Wessolly, L. & Erb, M. (2014): Handbuch der Baumstatik + Baumkontrolle, Berlin: Patzer
Winandy, J.E., 1994. Wood properties. Encyclopedia of Agricultural Science 4, 549—561.
Wohn, J. (2003). Untersuchungen zur Standsicherheit von Bäumen bei Wassergehaltsänderungen im Boden (Diplomarbeit). Fachhochschule Nürtingen.
Yang, M., Défossez, P., Danjon, F., Dupont, S., & Fourcaud, T. (2017). Which root architectural elements contribute the best to anchorage of Pinus species? Insights from in silico experiments. Plant and Soil, 411(1–2), 275–291.

Autorenangaben

Autor

Dipl.-Ing. ANDREAS DETTER

Brudi & Partner TreeConsult Baumsachverständige

Berengariastraße 9

82131 Gauting

Tel.: 089 - 752150

Fax: 089 - 7591217

E-Mail: a.detter@tree-consult.org

Prof. Dr. STEFFEN RUST

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Ressourcenmanagement

Büsgenweg 1a, 37077 Göttingen