



Baumstatik

Zerstörungsfreie Meßverfahren der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen

Thomas Sinn

INHALTSÜBERSICHT:

- * Statik und Festigkeitslehre von Bäumen - Zur Belastung der Bäume durch Wind
- * Eine Berechnungsmöglichkeit der Standsicherheit von Bäumen
- * Eine Berechnungsmöglichkeit der Bruchsicherheit von Bäumen
- * Entwicklung statikintegrierter Messverfahren Statikintegrierte Messverfahren - AfB-Methode zur Standsicherheitsüberprüfung
- * Statikintegrierte Messverfahren - Dilatometerverfahren zur Bruchsicherheitsüberprüfung

Definitionen Standsicherheit und Bruchsicherheit: Standsicherheit kennzeichnet die "Ausreichende Verankerung des Baumes im Boden". Bruchsicherheit ist die "Ausreichende Fähigkeit und Beschaffenheit des Baumes, dem Bruch von Stamm und Kronenteilen zu widerstehen". Definitionen nach ZTV-Baumpflege (2001).

Entsprechend diesen Definitionen werden in der Baumstatik zwei verschiedene Rechen- oder Messverfahren zur weitergehenden messtechnischen Stand- oder Bruchsicherheitsüberprüfung von Bäumen eingesetzt. Aussagen zur Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen sind nur möglich, wenn die Last- und Kraftgrößen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Die mechanische Hauptlast, der Bäume widerstehen müssen, ist der Wind. Die Windlastermittlung ist daher Grundlage jeder baumstatischen Untersuchung.

Zur Belastung der Bäume durch Wind

Wind entsteht in erster Linie durch Luftdruckdifferenzen. Er entwickelt kinetische Energie, die dem dynamischen Druck oder Staudruck entspricht. Man spürt diesen Druck, wenn die Windgeschwindigkeit auf Null abgebremst wird (zum Beispiel als Gegenwind beim Rad fahren).

Der Staudruck (q) ist eine Funktion aus der Luftdichte und Windgeschwindigkeit. Die Luftdichte hängt sowohl von der Temperatur als auch von der Meereshöhe ab. Diese Abhängigkeit hat nach Stoeckel (1993) bei gleich bleibender Windgeschwindigkeit folgende Größenordnung:

Zunahme des Staudruckes bei einer Temperaturabnahme von $+30^\circ$ auf -25° : + 21 %.

Abnahme des Staudruckes bei einer Zunahme der Meereshöhe von 0 m auf 2000 m : - 11 %.

Die Windgeschwindigkeit wird in m/sec. oder km/h angegeben.

WINDSTÄRKEN NACH BEAUFORT

Windstärken und Bezeichnung in m/sec. + km/h

0 = still: 0 - 0,2 m/sec. 0 - 1 km/h

1 = leichter Zug: 0,3 - 1,5 m/sec. = 1 - 5 km/h

2 = leichte Brise: 1,6 - 3,3 m/sec. = 6 - 11 km/h

3 = schwache Brise: 3,4 - 5,4 m/sec. = 12 - 19 km/h



- 4 = mäßige Brise: 5,5 - 7,9 m/sec. = 20 - 28 km/h
 5 = frische Brise: 8 - 10,7 m/sec. = 29 - 38 km/h
 6 = starker Wind: 10,8 - 13,8 m/sec. = 39 - 49 km/h
 7 = steifer Wind: 13,9 - 17,1 m/sec. = 50 - 61 km/h
 8 = stürmischer Wind: 17,2 - 20,7 m/sec. = 62 - 74 km/h
 9 = Sturm: 20,8 - 24,4 m/sec. = 75 - 88 km/h
 10 = schwerer Sturm: 24,5 - 28,4 m/sec. = 89 - 102 km/h
 11 = orkanartiger Sturm: 28,5 - 32,6 m/sec. = 103 - 117 km/h
 12 = Orkan: 32,7 - 36,9 m/sec. = 118 - 132 km/h .

Doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet vierfache Windlast. Bei Windstärke 6 beträgt die Windlast etwa 10 % der Orkanwindlast, bei Windstärke 8 knapp 30 % und bei Windstärke 10 etwa 55 %.

Je nach der Geländetopographie kann die Staudruckerhöhung auf Geländeerhebungen das 4-fache betragen, zwischen höheren Gebäuden das 2,6-fache. Erhöht werden die Belastungen des Baumes außerdem durch die Bögigkeit des Windes und die Eigenschwingung. Andererseits verringert sich der Staudruck aufgrund der Durchlässigkeit der Baumkrone bei hohen Windgeschwindigkeiten um etwa 70 % (Luftwiderstandsbeiwert c_w). Die Windlast (W) eines Baumes hängt außerdem ab von der Windangriffsfläche (A), das heißt der Baumgröße. All diese Faktoren gehen über entsprechende mathematische Formeln in die Windlastberechnung als Grundlage für statikintegrierte Stand- und Bruchsicherheitsüberprüfungen von Bäumen ein.

WINDLASTERMITTLUNG

Die Windlastermittlung erfolgt nach der Windkraftformel $W = c_w * q * A$, modifiziert in Anlehnung an Mayhead, Th. Sinn, Wessolly und Davenport. Der Ausgangs- c_w -Wert und der Standortfaktor werden aufgrund der Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Untersuchungen bestimmt.

Die Flächenbestimmung des Baumes erfolgt unter Berücksichtigung der größten Windangriffsfläche durch Digitalisierung einer Baumfotografie (method. Fehler + / - 3 %).

Die Berechnungen werden unter Berücksichtigung der Standorthöhe des Baumes über NormalNull mit entsprechendem Luftdruck und für die Jahresdurchschnittstemperatur Deutschlands (14 °C) durchgeführt.

Beim Bezug der Windlast auf die jeweilige Windstärke nach Beaufort wird die jeweils maximale im Windstärkenbereich auftretende Windgeschwindigkeit berücksichtigt.

Dynamische Windlastverstärkungsfaktoren (Bögigkeit und Eigenschwingung) werden aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen von Amtmann, Mayer, Schlaich u.a. berücksichtigt und ausgewiesen.

WINDLASTFORMEL:

$$W = c_w \times q_{eff} \times A$$

* W = Windlast

* c_w = Luftwiderstandsbeiwert



- * q = effektiver Staudruck
- * A = Windangriffsfläche

Zur Windlastermittlung sind spezielles Fachwissen und eine spezielle Auswertesoftware erforderlich. Daher bietet die Arbeitsstelle für Baumstatik Interessierten unter anderem den Service einer Windlastermittlung an. Außer Angaben zur genau gemessenen Baumhöhe werden lediglich der Stammumfang, die Ortshöhe und zum Beispiel ein Polaroid-Foto mit der nachgezeichneten Baumkontur benötigt.

Beispiele von Windlasten von Eichen je nach Baumhöhe zeigt das nachfolgende Diagramm. Das Ergebnis der Windlastberechnung bezieht sich auf Windstärke 12 nach Beaufort und wird in der Einheit Kilonewtonmeter (kNm) angegeben (Windlastmoment oder einfach Windlast).

Nach dem gesetzlich vorgeschriebenen internationalen Einheitensystem SI ist ein Newton gleich der Kraft, die einem Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s erteilt.

- * $1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$
- * $1 \text{ N} = 0,1 \text{ kp}$ ($1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$)
- * $1 \text{ kN} = 1000 \text{ N}$
- * 1 kN entspricht $0,098 \text{ To}$, rund $0,1 \text{ To}$ (100 kg)
- * 10 kN (oder kNm) entsprechen der Masse einer Gewichtskraft von rd. 1 Tonne.

Die Einheit ist benannt nach dem englischen Physiker Sir Isaak Newton (1643-1727). Von ihm stammt unter anderem das Gravitationsgesetz.

Exkurs: Zum cw-Wert von Bäumen

Ein wesentliches Element statikintegrierter Neigungs- und Dehnungsmessungen an Bäumen zur Überprüfung der Stand- und Bruchsicherheit sind die Windlastannahmen. Bäume sind keine starren Baukörper. Der Wind kann durch die Kronen hindurchblasen und unter Windbelastung gibt die elastische Baumkrone dem Winddruck nach. Der Baum „bückt“ sich und „legt die Ohren an“.

Für die Entwicklung der Baumstatik waren insbesondere die Arbeiten von Mayhead (1973) von Bedeutung. Bei seinen Versuchen mit Nadelbäumen im Windkanal wurden für Windstärke 12 cw-Werte um 0,2 festgestellt.

Weitere cw-Wertmessungen erfolgten insbesondere an der Universität Stuttgart mit einer speziellen Windmeßanlage während des Orkans Vivian im Februar 1990. Die Messungen an einer Kiefer ergaben cw-Werte bis etwa 0,23 bei Windstärke 12. Bei gleichzeitig gemessenen Laubbäumen lag der cw-Wert deutlich darunter, vor allem da sie unbelaubt waren.

Aktuellere Messungen von Wessolly auf Korsika weisen an einer immergrünen, 11,30 m hohen Eiche bei Windstärke 10 einen cw-Wert von etwa 0,28 nach. Da der Luftwiderstandsbeiwert c_w von Bäumen mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnimmt, kann nach den bislang vorliegenden Meßkurven für diesen Baum ebenfalls ein cw-Wert um etwa 0,2 bei Windstärke 12 extrapoliert und angenommen werden.



Allen bislang veröffentlichten Messungen zum Luftwiderstandsbeiwert c_w von belaubten Bäumen ist eines gemeinsam: Es handelte sich um relativ kleine Bäume beziehungsweise um Nadelbäume. Daher wurden stets geringe c_w -Werte um 0,2 gemessen (der c_w -Wert ist ein Multiplikator bei den Windlastannahmen von Bäumen und daher von eminenter Bedeutung für die Windlastermittlung).

Viele Widrigkeiten gilt es bei der c_w -Wertmessung von Bäumen zu überwinden:

1. Orkane kommen nicht auf Bestellung.
2. Zur Zeit der Winterorkane sind die heimischen Laubbäume unbelaubt.
3. Die Windstärkemessung muß im Bereich des Windlastschwerpunktes in der Krone erfolgen. Bei großen Bäumen kann der Windlastschwerpunkt in einer größeren Höhe als 20 m sein.
4. Die Messungen erfordern einen erheblichen Zeit- und Materialaufwand (siehe nachfolgende Versuchsbeschreibung).

Große Altbäume weisen häufig Kronensegel von mehreren hundert Quadratmetern Fläche und ein entsprechend großes Kronenvolumen sowie eine geringe Nachgiebigkeit der Äste und Zweige auf.

Ein Feldversuch zur c_w -Wertbestimmung

Am 27.10.2002 zog der Orkan Jeanette mit Windgeschwindigkeiten bis zu 152 km/h über Deutschland hinweg und richtete schwere Schäden an. Dieses Sturmereignis bot günstige Voraussetzungen für Belastungsmessungen. Zum einen wurde von den Wetterdiensten der genaue Zeitpunkt des Eintreffens des Orkans vorhergesagt und zum anderen waren die meisten Bäume noch immer belaubt und boten so ideale Voraussetzungen für Windwiderstandsmessungen. Aufgrund dieser günstigen Voraussetzungen und der Möglichkeit des Anbringens einer Windmeßanlage im Bereich des Kronenschwerpunktes ergab sich im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes der Arbeitsstelle für Baumstatik erstmals die Möglichkeit einer Messung zur Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes c_w an einem mehr als 20 m hohen, etwa 350 Jahre alten Naturdenkmalbaum mit mehr als zweihundert Quadratmetern Kronensegelfläche.

Die „Pfarrgarten-Eiche“ mit einem Stammumfang von fast 6 m steht in einem Pfarrgarten nahe Frankfurt am Main. Nach Westen steht sie weitgehend frei. Die Windlastannahmen erfolgten im Vorfeld der Windstärke- und Dehnungsmessungen.

Es wurde ein Polaroid-Foto der Eiche gefertigt, die Baumkonturen eingezeichnet, die Baumhöhe gemessen und anschließend das Bild im Windlastprogramm der Arbeitsstelle für Baumstatik digitalisiert. Über verschiedene Lastbeiwerte für die windangeblasene Baumstruktur wurden die Windlastannahmen erstellt.

Am Tag des Orkans wurde die Windmeßanlage bis in der Höhe des Windlastschwerpunktes der Eiche installiert. Der Abstand der ersten Windmeßstation bis zum Kronenmantel der Eiche betrug 11,20 m. Eine zweite Windmeßstation wurde vor der Eiche in 16,30 m Entfernung zum Kronenmantel bis in 3,60 m Höhe aufgestellt. Am Stammfuß der Eiche wurde ein Dilatometer (Setz-Dehnungsmesser) angebracht. Alle verwendeten Meßgeräte verfügen über einen min-/max-Speicher, das heißt es wird der jeweils größte Ausschlag auf der Meßskala gespeichert und auf dem Display angezeigt.



Die Geräte wurden von Beginn des Sturmereignisses an fortlaufend abgelesen. Alle Veränderungen von Windstärke 8 - 11 wurden während der mehrstündigen Messungen fortlaufend festgehalten. Danach wurde die Meßstelle, das heißt die Einstichpunkte der zwei Nadeln des Dilatometers am Stammfuß, mit wetterfestem Farbpastenstift für die nachfolgenden Messungen markiert.

Vier Tage nach den Windstärke- und Dehnungsmessungen im Orkan Jeanette, die sich über zwei Tage erstreckten, erfolgte an dem Baum bei Windstille ein Zugversuch in Ostrichtung, also genau in der Belastungsrichtung des Baumes unter dem orkanartigen Sturmereignis aus Westrichtung. Ein Vergleich zwischen den unter der tatsächlichen Windbelastung gemessenen Dehnungsmeßwerten mit den Dehnungsmeßwerten unter definierter Zugbelastung ließ eindeutige Rückschlüsse auf die tatsächliche Belastung des Baumes bei den verschiedenen Windstärken zu.

Es mußten bei den Windlastannahmen für verschiedene Windstärken nur noch die Luftwiderstandsbeiwerte c_w im Baumstatikprogramm der Arbeitsstelle für Baumstatik so lange angepaßt werden, bis die Windlasten der Windlastannahmen mit den unter Zugbelastung gemessenen Zugkräften übereinstimmten.

Das Ergebnis war erstaunlich: Bei Windstärke 11 wurde der Altbaum durch den orkanartigen Sturm am Stammfuß mit fast 1.000 kNm belastet (dies entspricht der Masse einer Gewichtskraft von ca. 100 Tonnen). Dieser enormen Belastung widerstand der bis auf wenige Zentimeter Restwanddicke ausgefaulte und in der Vergangenheit bereits angebrochene Baumstamm problemlos.

Die (bislang einmaligen) Meßergebnisse zeigen, daß bei baumstatischen Analysen die Luftwiderstandsbeiwerte c_w je nach Flexibilität der Krone zu modifizieren sind. Ältere Bäume mit sperrigen Ästen und relativ großen Kronen setzen dem Wind einen größeren Widerstand entgegen. Sie weisen einen deutlich höheren c_w -Wert auf als bislang bekannt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens der Arbeitsstelle für Baumstatik, das fortgesetzt wird, konnten bislang außer von der Pfarrgarten-Eiche c_w -Werte für einen mehr als 12 m hohen, etwa 50 Jahre alten und gekappten Birkenaltbaum im Orkan gewonnen werden. Außerdem erfolgten Messungen im Sturm an einer Säulenpappel.

NACHFOLGEND:

* Diagramm mit der Darstellung der gemessenen zunehmenden Belastung der Pfarrgarten-Eiche mit zunehmender Windstärke (Wert für Windstärke 10 interpoliert) 2.

Eine Berechnungsmöglichkeit der Standsicherheit von Bäumen

Die ersten statischen Berechnungen für Bäume dienten dem Nachweis der Standsicherheit und basierten auf einer Gleichgewichtsbetrachtung durch den Vergleich zwischen dem Standmoment und dem Kippmoment aus der Windlast.

Ein Moment ist das Produkt aus einer Kraft oder Last und dem Hebelarm.

* Das Standmoment (M_s) ist das Produkt aus dem Eigengewicht (N) des Baumes einschließlich seines statisch wirksamen Wurzelraumes und dem horizontalen Kraftarm (a) vom Angriffspunkt der Kraft am Stammfuß bis zur Kippkante.



* Das Kippmoment (M_k) ist das Produkt aus der Windlast (W) und dem vertikalen Lastarm (l) vom Angriffspunkt der Last im Lastschwerpunkt bis zum Stammfuß bzw. zur Kippkante.

Wirkt z.B. in 10 m Höhe eine Windlast von 10 kN auf eine bestimmte Teilfläche des Baumes, so beträgt das Moment aus dieser Last –verstärkt durch den 10 m langen Hebelarm- am Stammfuß 100 kNm, also das 10-fache.

Zur Verdeutlichung dient das nachfolgende Schaubild zur Baumstatik.

NACHFOLGEND: Schaubild zur Baumstatik

3. Eine Berechnungsmöglichkeit der Bruchsicherheit von Bäumen

Baumbruch geschieht in der Regel durch hohe Windbelastung. Unter Windeinfluß biegt und dreht sich der Baum. Im Traggerüst des Baumes entstehen Verformungen. Diesen Verformungen setzt der Holzkörper einen Widerstand entgegen. Aus der Verformung und dem Widerstand resultieren Spannungen. Dies sind Kräfte, die durch äußere Einwirkung in einem beanspruchten Körper entstehen.

Beim reinen Biegebruch ergibt sich die maximale Spannung aus dem Biegemoment, das der Windlast entspricht, und dem Widerstandsmoment des Querschnittes.

Das Widerstandsmoment ist ein Maß für die Biegesteifigkeit eines Trägers. Es ist eine unvorstellbare geometrische Größe. Die Bruchsicherheit eines Stamm- oder Astquerschnittes wird vor allem von der Baumdicke bestimmt. Je dicker der Stamm ist, desto höher ist das Widerstandsmoment im Randfaserbereich (Stamm- oder Ast-Mantel), denn der Abstand von der Spannungs-Nulllinie in der Stammachse zur Randfaser im Stamm- oder Ast-Mantel geht in der 3. Potenz in die Gleichung zur Widerstandsmomentenbestimmung ein.

Es gilt: Doppelter Stamm-/Astdurchmesser = achtfache Bruchsicherheit.

Desweiteren ist die Form des belasteten Querschnittes zur Bestimmung des Widerstandsmomentes von Bedeutung. Handelt es sich zum Beispiel um annähernd kreisrunde Baumstämme, die untersucht werden sollen, lässt sich das Widerstandsmoment des Kreisquerschnittes einfach berechnen.

Der Rechenweg ist folgender:

Biegemoment (aus der Windlast) / Widerstandsmoment (aus dem Kreisquerschnitt) = maximale Spannung.

Durch Vergleich der minimalen Holzfestigkeit mit der maximalen Spannung ergibt sich die Sicherheit gegen Bruch.

Minimale Holzfestigkeit / maximale Spannung = Bruchsicherheit

Rechenbeispiele:

BERECHNUNG DES WIDERSTANDSMOMENTES:

Der Stammdurchmesser ergibt sich aus dem Stammumfang / 3,14 (Pi). Kreisförmiger, vollholziger Stammquerschnitt = $3,14 \times \text{Stammdurchmesser}^3 / 32$.

Beispiel:



Eiche, Stammdurchmesser abzüglich der Rindendicke = 1 m.

Berechnung: $3,14 \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} / 32 = \text{Widerstandsmoment } 98.125 \text{ cm}^3$.

Handelt es sich zum Beispiel um annähernd kreisrunde Baumstämme mit annähernd kreisrunden Ausfaltungen, die untersucht werden sollen, lässt sich das Widerstandsmoment des Kreisringquerschnittes ebenfalls relativ einfach ermitteln.

Ausgefauter Stammquerschnitt = $3,14 \times (\text{Stammaußendurchmesser}^4 - \text{Höhlungsdurchmesser}^4) / (32 \times \text{Stammaußendurchmesser})$

Beispiel: Eiche, Stammdurchmesser wie oben 1 m, Restwanddicke 10 cm, d.h.

Höhlungsdurchmesser = $100 - 2 \times 10 \text{ cm} = 80 \text{ cm}$.

Berechnung:

$3,14 \times (100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} - 80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}) / 32 \times 100 \text{ cm} =$

$3,14 \times (100.000.000 - 40.960.000) / 3.200 =$

$3,14 \times 59.040.000 / 3.200 =$

$3,14 \times 18450 = \text{Widerstandsmoment } 57.933 \text{ cm}^3$.

BERECHNUNG DER MAXIMALEN SPANNUNG

Berechnung der Bruchsicherheit für ein angenommenes Windlastmoment von 1.000 kNm bei Windstärke 12:

Die maximale Spannung im Holzkörper des Baumes ergibt sich aus Windlastmoment / Widerstandsmoment.

Umrechnung: $1.000 \text{ kNm} = 100.000 \text{ kNcm}$.

Kreisförmiger, vollholziger Stammquerschnitt: $100.000 \text{ kNcm} / 98.125 \text{ cm}^3 = \text{maximale Spannung im Orkan rd. } 1,02 \text{ kN/cm}^2$.

Ausgefauter Stammquerschnitt: $100.000 \text{ kNcm} / 57.933 \text{ cm}^3 = \text{maximale Spannung im Orkan rd. } 1,73 \text{ kN/cm}^2$.

BERECHNUNG DER BRUCHSICHERHEIT

Maximal aushaltbare Spannung für Eichenholz lt. Untersuchungen der Universität Stuttgart = $2,80 \text{ kN/cm}^2$ (siehe nachfolgende Auflistung „Zu den Materialeigenschaften grüner Hölzer“ unter „Quercus ..“ und „Druckfestigkeit längs zur Faser“).

Kreisförmiger, vollholziger Stammquerschnitt $2,80 \text{ kN/cm}^2 / 1,02 \text{ kN/cm}^2 = \text{rd. } 2,7\text{-fache Bruchsicherheit}$. Rechnerische Bruchsicherheitsreserven gegen Orkanwindbelastung = $2,7\text{-fach} = 270 \%$.

Ausgefauter Stammquerschnitt $2,80 \text{ kN/cm}^2 / 1,73 \text{ kN/cm}^2 = \text{rd. } 1,6\text{-fache Bruchsicherheit}$. Rechnerische Bruchsicherheitsreserven gegen Orkanwindbelastung = $1,6\text{-fach} = 160 \%$.

Legt man wegen der Unwägbarkeiten der rechnerischen Bruchsicherheitsermittlung einen zumindest erforderlichen Sicherheitsabstand von 1,5-facher Bruchsicherheit, also 150 % zugrunde, wären beide Bäume noch bruchsicher.

ZU DEN MATERIALEIGENSCHAFTEN GRÜNER HÖLZER

Die Bruchsicherheit von Bäumen wird unter anderem von den artspezifischen Holzeigenschaften bestimmt. Die Ermittlung von Materialdaten für den unteren Stammbereich aus mehreren tausend Proben grünen Holzes erfolgte ab 1987 im Rahmen des Sonderforschungsbereiches „Natürliche Konstruktionen“ durch die Universität Stuttgart (Wessolly 1992).



Bruchsicherheitsrelevante Werte sind vor allem der Biegeelastizitätsmodul sowie die Druckfestigkeit längs zur Faser. Das Verhältnis Druckfestigkeit / Elastizitätsmodul bestimmt die Elastizitätsgrenze, ab der plastische Verformung des Holzkörpers einsetzt und der Bruchversagensvorgang beginnt. Bei den nachfolgenden Werten handelt es sich um Mittelwerte abzüglich der Standardabweichung. Sie wurden dem Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle von Wessolly und Erb entnommen.

Desweiteren werden Anmerkungen insbesondere zur Bruchsicherheit von Ästen gemacht sowie zu maximalen Windlastmomenten, bezogen auf Windstärke 12 und den Zustand der vollen Belaubung.

Nachfolgende Tabelle:

Von oben nach unten abnehmende Bruchsicherheit der Stämme, bezogen auf die Materialeigenschaften.

Nachfolgend bedeuten:

A: Elastizitätsgrenze (%), B: Druckfestigkeit längs z. Faser (kN/cm²), C: Elastizitätsmodul (kN/cm²)

Acer campestre: A: 0,43 %, B: 2,55 (kN/cm²), C: 600 (kN/cm²).

Allgemein bis in das hohe Alter hinein eine der sichersten Baumarten. Es werden Windlastmomente von 660 kNm bei 24 m Baumhöhe erreicht.

Platanus acerifolia: A: 0,43 %, B: 2,70 (kN/cm²), C: 625 (kN/cm²).

Ebenfalls eine der sichersten Baumarten. Altbäume bilden auf geeigneten Standorten glockenförmig zwei Wurzelebenen aus, dadurch enorm standfest. In einem Praxisfall waren mittelalte Bäume mit gestörter Wurzelentwicklung (vermutlich durch Verdichtungshorizont im Boden) umgestürzt. Altbäume mit enormen Windlasten bis über 3.600 kNm bei 33 m Höhe. Gefährdung durch Schnittmaßnahmen in der Krone und anschließendem Befall mit *Inonotus hispidus*. Widersteht dem Pilz bis in weit fortgeschrittene Befallsstadien. Bei Schiefstämmigkeit bzw. Befall an Ästen kann schon früher Bruchgefahr bestehen.

Castanea sativa: A: 0,42 %, B: 2,50 (kN/cm²), C: 600 (kN/cm²).

Allgemein bis in das hohe Alter hinein eine der sichersten Baumarten. *Fraxinus excelsior* 0,42 2,60 625 Bei Befall mit *Inonotus hispidus* wie *Platanus*. Es werden Windlastmomente bis 1200 kNm bei 26,50 m Baumhöhe erreicht.

Quercus petraea: A: 0,41 %, B: 2,80 (kN/cm²), C: 690 (kN/cm²).

Quercus robur: A: 0,41 %, B: 2,80 (kN/cm²), C: 690 (kN/cm²).

Beide gehören mit zu den sichersten Baumarten. Gutes Abschottungsvermögen bei Pilzbefall. Das Kernholz widersteht durch die Einlagerung von Kernholzstoffen mit bakterizider und fungizider Wirkung sehr lange. Bäume sind selbst bei Befall durch aggressive Pilzarten, wie Lackporlingen, noch lange verkehrssicher. 30 m hohe Bäume weisen Windlasten bis 1.700 kNm auf.

Sequoiadendron giganteum: A: 0,40 %, B: 1,80 (kN/cm²), C: 455 (kN/cm²).

Allgemein bis in das hohe Alter hinein eine der sichersten Baumarten. Es werden Windlastmomente von 1.200 kNm bei 31 m Baumhöhe erreicht.



Acer saccharinum: A: 0,33 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 600 (kN/cm²).

In der Altersphase besteht zunehmende Ausbruchgefahr insbesondere von ausladenden Ästen. Kurzlebige Baumart, wird selten älter als 120 Jahre. Windlastmomente bis mehr als 2.000 kNm bei 29 m Höhe.

Populus x hybrida: A: 0,33 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 605 (kN/cm²).

Es kann zunehmende Bruchgefahr vor allem der unteren ausladenden Äste im Alter ab etwa 50 Jahren bestehen. Erkennungsmöglichkeit: Anfänglich bogiger Wuchs der Äste, der mit zunehmender Entfernung vom Stamm mehr in die waagerechte übergeht. Bei 33 m hohen Bäumen kann das Windlastmoment um 2.200 kNm betragen. Populus ist eine schwach abschottende Baumgattung, d.h. Pilzbefall insbesondere an unbeschnittenen Bäumen ist besonders kritisch zu werten.

Betula pendula: A: 0,31 %, B: 2,20 (kN/cm²), C: 705 (kN/cm²).

Bei Befall mit Piptoporus betulinus besteht in der Regel Bruchgefahr. Nur geringe Windlastmomente, bei 24 m Baumhöhe werden Birken mit maxima 300 kNm belastet.

Acer pseudoplatanus: A: 0,29 %, B: 2,50 (kN/cm²), C: 850 (kN/cm²).

Windlastmomente bis 1.900 kNm bei 28 m Baumhöhe.

Populus nigra: A: 0,28 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 720 (kN/cm²).

Kann mehrere hundert Jahre alt werden. Weit ausladende Äste sind nach Erreichen der Altersphase zunehmend windbruchgefährdet. Schützenswerte, seltene einheimische Baumart.

Quercus rubra: A: 0,28 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 720 (kN/cm²).

In einem Praxisfall war eine Roteiche mit Befall durch Ganoderma umgestürzt. Das Wurzelwerk des Baumes war weitgehend zersetzt, der Stamm jedoch nur wenig angegriffen (gutes Abschottungsvermögen und hohe Pilzresistenz des Kernholzes). Es werden Windlastmomente um 1.900 kNm bei 30 m Baumhöhe erreicht.

Robinia pseudoacacia: A: 0,28 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 705 (kN/cm²).

Kernholzbildung und gutes Abschottungsvermögen. Altbäume, die selten älter als 120 Jahre werden, sind häufig hohl. Die Bäume sind meistens dennoch sicher, da bis 23 m hohe Bäume vergleichsweise geringe Windlastmomente um 350 kNm aufweisen. Befall mit Schwefelporling zumindest in der Anfangsphase der Fruchtkörperbildung hinsichtlich der Verkehrssicherheit ohne Bedeutung.

Aesculus hippocastanum: A: 0,27 %, B: 1,40 (kN/cm²), C: 525 (kN/cm²).

Alter maximal bis zu 400 Jahre. Geringes Abschottungsvermögen. Vorsicht bei Pilzbefall insbesondere am Stammfuß. Neigt zur Ausbildung bruchgefährdeter V-Zwiesel. Windlastmomente um 1.000 kNm bei 26 m Höhe.

Sorbus aria: A: 0,27 %, B: 1,60 (kN/cm²), C: 600 (kN/cm²).

Sorbus aucuparia: A: 0,27 %, B: 1,60 (kN/cm²), C: 600 (kN/cm²).

In einem Praxisfall waren Bäume mit nur geringer Wurzelbildung in regelmäßig gedüngten Baumscheiben an einem Straßenstandort umgestürzt. Vermutlich war das gute Nährstoffangebot in der Baumscheibe ursächlich für die unterlassene Ausbildung ausreichender Haltewurzeln. Es werden Windlastmomente bis 120 kNm bei 13 m Baumhöhe erreicht.



Fagus selvatica und Fagus sylvatica „Atropunicea“: A: 0,26 %, B: 2,25 (kN/cm²), C: 850 (kN/cm²).

Die Bruchsicherheit bei Pilzbefall wird insbesondere durch die Wuchsform bestimmt. Bei Ausbildung regelrechter Wurzelplatten ungeachtet der Pilzart meistens noch verkehrssicher. Bei Befall mit *Fomes fomentarius* besteht meistens Bruchgefahr, insbesondere Ausbruchgefahr von Ästen. Rotbuchen neigen zur Ausbildung bruchgefährdeter V-Zwiesel. Windlastmomente bis 3.100 kNm bei 36 m Höhe.

Ailanthus altissima: A: 0,25 %, B: 1,60 (kN/cm²), C: 640 (kN/cm²).

Zunehmende Astbruchgefahr vor allem weit ausladender und exponierter Äste im hohen Baumalter. Es werden Windlastmomente bis 550 kNm bei 22 m Baumhöhe erreicht.

Tilia euchlora: A: 0,25 %, B: 1,75 (kN/cm²), C: 700 (kN/cm²).

Der Baum vergreist früh. Geringes Abschottungsvermögen gegen holzabbauende Pilze. In Parkanlagen können insbesondere an alten Astabschnitten Spechthöhlen gezimmert sein. Geringe Windlastmomente, bei 21 m hohen Bäumen um 350 kNm.

Tilia platyphyllos: A: 0,25 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 800 (kN/cm²).

Tilia cordata: A: 0,24 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 830 (kN/cm²).

Unbeschnittene Bäume mit Befall durch Lackporlinge (*Ganoderma* ssp.) oder Brandkrustenpilz (*Hypoxylon* ssp.) sind meistens kipp-/bruchgefährdet. Vergleichsweise hohe Windlastmomente bis 1.700 kNm bei 34,50 m Höhe.

Tilia tomentosa: A: 0,24 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 835 (kN/cm²).

Wie *Tilia platyphyllos* und *T. cordata*. Windlastmomente von 1450 kNm bei 28 m Höhe. Neigt zur Ausbildung bruchgefährdeter V-Zwiesel.

Salix alba „Tristis“: A: 0,23 %, B: 1,60 (kN/cm²), C: 700 (kN/cm²).

Kurzlebig, der Baum wird selten älter als 100 Jahre. Im hohen Alter zunehmende Ausbruchgefahr weit ausladender Äste. In der Endphase häufig Pilzbefall durch *Phellinus* ssp. Meistens besteht dann bei unbeschnittenen Bäumen Bruchgefahr.

Populus nigra „Italica“: A: 0,22 %, B: 1,60 (kN/cm²), C: 730 (kN/cm²).

Erreicht nur selten ein Alter von mehr als 100 Jahren. In der Altersphase häufig Naßkernbildung und im Stamminnern hohl. Dennoch sehr lange standfest, da im Verhältnis zu den Stamm-/Wurzeldimensionen nur geringe Windangriffsfläche (maximale Windlast bei 33 m Baumhöhe 900 kNm).

Salix alba: A: 0,21 %, B: 1,60 (kN/cm²), C: 775 (kN/cm²).

Wie *Salix alba „Tristis“*. Bäume mit Befall durch den Schwefelporling waren zumindest in der Anfangsstadium des Befalles trotz des geringen Abschottungsvermögens der Gattung meistens noch bruchsicher. Es werden Windlastmomente bis 650 kNm bei 26 m Baumhöhe erreicht.

Pseudotsuga menziesii: A: 0,20 %, B: 2,00 (kN/cm²), C: 1000 (kN/cm²).

Freistehende Bäume sind trotz der ungünstigen Holzeigenschaften in der Regel stand- und bruchsicher. Ab Erreichen der Altersphase besteht zunehmende Bruchgefahr von Ästen. Es werden Windlastmomente um 700 kNm bei 32 m Baumhöhe erreicht.



Cedrus ssp.: A: 0,20 %, B: 1,50 (kN/cm²), C: 765 (kN/cm²).

Freistehende Bäume sind trotz der ungünstigen Holzeigenschaften in der Regel stand- und bruchstabil. Ab Erreichen der Altersphase besteht zunehmende Bruchgefahr von Ästen. Es werden Windlastmomente bis 950 kNm bei 22 m Baumhöhe erreicht.

Picea omorika: A: 0,18 %, B: 1,60 (kN/cm²), C: 900 (kN/cm²).

Trotz geringer Windlastmomente nicht selten ungenügende Verankerung und Kippgefahr insbesondere von Altbäumen an windexponierten Standorten.

Die Anmerkungen des Verfassers zu Pilzbefall und Verkehrssicherheit beziehen sich jeweils auf freistehende Bäume.

Außer den Materialeigenschaften des Holzes sind das Windlastmoment der Baumkrone je nach Größe etc., das Widerstandsmoment des Baumstammes je nach Dicke und Form (beides kann zusammengefasst sehr grob durch die h/d-Verhältnisse eingeschätzt werden), das Abschottungsvermögen des Baumes gegen holzabbauende Pilze in Abhängigkeit von der Vitalität, die Pilzart und deren Befallsstadium, die Restwanddicke usw. weitere bedeutsame die Bruchstabilität des Baumstammes beeinflussende Einflußgrößen.

Die innere Vorspannung (Wachstumsspannung) im vollholzigen Material trägt zusätzlich zur Sicherheit bei. Die Druckspannung im Kern wirkt der äußeren Zugspannung ausgleichend entgegen. Unter Biegebelastung muß sie zunächst überwunden werden, ehe es zu einer Spannungserhöhung kommt. Bei verletzten oder ausgefaulten Stämmen und Ästen ist dieser Wirkmechanismus im Schadbereich gestört.

4. Entwicklung statikintegrierter Messverfahren

Je nach dem Untersuchungsziel werden in der Baumstatik zwei verschiedene Messverfahren zur weitergehenden messtechnischen Standsicherheitsüberprüfung oder Bruchstabilitätsüberprüfung von Bäumen eingesetzt. Dies sind statikintegrierte windlastorientierte Neigungsmessungen zur Überprüfung der Standsicherheit (AfB-Methode) oder statikintegrierte windlastorientierte Setz-Dehnungsmessungen zur Überprüfung der Bruchstabilität (Dilatometerverfahren). Zum besseren Verständnis der heutigen statikintegrierten Meßmethoden ist eine Darstellung der Entwicklungsschritte in der Baumstatik erforderlich.

Wesentliche Grundlage aller Untersuchungen ist die visuelle Zustandsüberprüfung nach bestimmten Kriterien, die –eine entsprechende fachliche Integrität des Baumkontrolleurs vorausgesetzt- in den meisten Fällen qualitativ ausreichende Aussagen zur Stand- und Bruchstabilität zuläßt. In Grenzfällen der visuellen Baumbeurteilung hinsichtlich einer Gefährdung der Stand- / Bruchstabilität kann der Einsatz quantitativer Verfahren erforderlich werden.

Dies war vor 24 Jahren Anlaß zur Entwicklung der Baumstatik. Das Geburtsjahr dieses vom Vater des Verfassers, Günter Sinn, gegründeten Fachbereiches ist das Jahr 1980. Im Zusammenhang mit U-Bahnbauarbeiten in der Bockenheimer Landstrasse in Frankfurt am Main waren damals sachverständige Aussagen zur Standsicherheit einer Platane erforderlich, in deren Wurzelraum durch Leitungsverlegungsarbeiten eingegriffen worden war. Durch rechnerische, aus der Baustatik entlehnte und modifizierte Verfahren sowie Beobachtungen



und Messungen an Bäumen wurde die gestörte Gleichgewichtsbeziehung zwischen der Gewichtskraft des Baumes und der von außen angreifenden Windlast nachgewiesen. Hierzu wurden baumstatische Untersuchungsmethoden entwickelt und angewandt.

Die ersten statischen Berechnungen für Bäume dienten dem Nachweis der Standsicherheit und basierten auf einer Gleichgewichtsbetrachtung zwischen dem Standmoment und dem Kippmoment aus der Windlast. Die statischen Berechnungen von Bäumen waren Anfang der 80-er Jahre ein Novum. Es mussten durch G. Sinn für die Fachwelt unter anderem neue Begriffe formuliert werden.

Der „statisch wirksame Wurzelraum“, begrenzt durch die Abrisskanten, wurde damals als Teil des Gesamtwurzelsystems eines Baumes definiert, der zusammen mit der Gewichtskraft des oberirdischen Baumes die 1,5-fachen Kippkräfte aufnehmen kann. Seine Größe wurde rechnerisch aus der Windlast und dem geschätzten Baum- und Bodengewicht ermittelt. Dabei zeigte sich eine weitgehende Übereinstimmung der errechneten Dimensionen des statisch wirksamen Wurzelraumes mit der Größe der Wurzelballen geworfener Bäume. Bei Abgrabungen im Wurzelraum von Bäumen wurde daher versucht, die Standsicherheit auf dieser Basis rechnerisch zu ermitteln.

Es folgten Jahre der stetigen Weiterentwicklung der Rechenmethoden. Statikprogramme nach G. Sinn zur Ermittlung der Windlast und Standsicherheit sowie Kronenreduktion wurden erstellt von: F. Hund (Sachverständigen-Kuratorium - SVK -), A. Förg sowie S. Krüger und G. Fritz (Arbeitsstelle für Baumstatik - AfB -). Außerdem wurden die Verfahren der Baumdatenaufnahme und Standsicherheitsbestimmung laufend verbessert.

Genannt seien weiterhin: Die Rastermethode nach G. Sinn zur Auswertung der fotooptisch erfaßten Windangriffsfläche des Baumes zur Ermittlung der Windlast und die ersten Ansätze der statikintegrierten Standsicherheitsmessung an einer Eiche in Kaiserslautern im Jahr 1984 (erster windlastbezogener Zugversuch) sowie der statikintegrierten Bruchsicherheitsberechnung der Kronenteile von Gleditsien in der Günthersburgallee in Frankfurt am Main im Jahr 1985. Vorausgegangen waren Materialprüfungen grüner Hölzer.

In zahlreichen Vorträgen, Aufsätzen in Fachzeitschriften und Gutachtenveröffentlichungen in der Schriftreihe Taxationspraxis des Sachverständigen-Kuratoriums (SVK) wurden die Ergebnisse jeweils der Fachöffentlichkeit mitgeteilt. Die theoretischen und praktischen Arbeiten waren begleitet von experimentellen Untersuchungen insbesondere zur Wurzelausbreitung und Verankerung der Bäume im Boden. Hierfür wurden 1984 verletzungsfreie Spülverfahren entwickelt. Im gleichen Jahr erfolgte die Gründung der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB), des ersten Prüfinstitutes der statikintegrierten Stand- und Bruchsicherheitsüberprüfung von Bäumen.

Wie heute aufgrund des zwischenzeitlich erfolgten Fortschrittes in Sachen Standsicherheitsüberprüfung von Bäumen bekannt ist, war ein eindeutiger Nachweis so jedoch kaum möglich, da das Baumgewicht am lebenden Objekt nur näherungsweise bestimmt werden kann. Außerdem setzt die Gewichtskraftberechnung des statisch wirksamen Wurzelraumes die Kenntnisse des Bodens und der dem Einblick verschlossenen Wurzelausbreitung auch in die Tiefe voraus. Aus der unregelmäßigen Verteilung von Baumwurzeln im Boden, insbesondere an Straßenstandorten, folgt, dass die Form des statisch wirksamen Wurzelraumes nicht eindeutig abgegrenzt werden kann. Die Verankerungskraft



der Wurzeln im Boden, die unter anderem abhängig ist von der Reibung und der Gefügestabilität (beeinflusst u.a. durch den Scherwiderstand, Kohäsions- und Adhäsionskräfte) bleibt bei solchen relativ einfachen Gleichgewichtsbetrachtungen außer Betracht. Es mussten neue, experimentelle Wege der Standsicherheitsbestimmung von Bäumen gefunden werden.

Die besondere Aufgabenstellung der Bruchsicherheitsuntersuchung von Astaufsitzern in den Kronen von Roßkastanien am Poppelsdorfer Weiher in Bonn erforderte 1986 den Kontakt zu einer Wissenschaftseinrichtung, die die erforderlichen Prüfgeräte und Auswerteverfahren zur Verfügung stellen konnte. Durch Empfehlung der Professoren Frei Otto und U. Kull ergab sich eine Verbindung zum Institut für Modellstatik der Universität Stuttgart (Professor Dr. R. Müller und dem wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr.-Ing. L. Wessolly). Die baumstatischen Problemstellungen aus der Praxis waren an der Universität ein Novum. Die Idee der windlastorientierten Belastungstests von 1984 wurde nun konsequent in die Praxis umgesetzt. Insbesondere zwischen 1986 und 1992 erfolgten zahlreiche messtechnisch überwachte Umzugversuche an Altbäumen (meist Fällkandidaten), die die Entwicklung und fortlaufende Verbesserung der Mess- und Auswerteverfahren ermöglichten.

Vor allem von Stoechel wurden am Institut für Modellstatik ab 1986 Meßgeräte und EDV-Programme zur Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen entwickelt, die im Rahmen der Sachverständigentätigkeit von G. Sinn mit diesem bzw. der Arbeitsstelle für Baumstatik vor Ort erprobt wurden. Die in dieser Zeit entwickelten windlastorientierten Neigungs- und Dehnungsmessverfahren sind Prognoseverfahren, die unter anderem durch die o.g. Umzugversuche wissenschaftlich abgesichert wurden. Sie wurden gemeinsam als Inclinomethode der Fachwelt vorgestellt.

Aufgrund von Literaturstudien zu Windeinflüssen, vorwiegend auf technische Bauwerke und Nadelbäume im Wald, erweiterte Wessolly außerdem die Windlastannahmen nach G. Sinn. Desweiteren wurden am Institut für Modellstatik bis 1991 durch Löffler und Wessolly umfangreiche physikalische Untersuchungen grüner Hölzer durchgeführt (Stuttgarter Festigkeitskatalog – bisher nur auszugsweise veröffentlicht). Die Materialkennwerte sind Grundlage der Bruchsicherheitsberechnungen. Für die Ermittlung der Standsicherheit sind sie ohne Belang.

Besonders erwähnenswert sind die ebenfalls in Teamarbeit (Kayser, Stoechel, Wessolly u.a.) auf Anregung von G. Sinn durchgeführten Untersuchungen und Berechnungen zur Wirksamkeit von Gewindestäben, die bisher bei Baumpflegemaßnahmen zur Stabilisierung in Stamm- und Asthöhlungen eingebaut wurden. Versuchsobjekt war 1987 die aus Veröffentlichungen bekannte Blutbuche im Park der Villa Berg, deren Begutachtung in städtischem Auftrag vom Verfasser durchgeführt wurde. Durch einen messtechnisch begleiteten Umzugversuch konnte die weitgehende Wirkungslosigkeit der in diesen Baum eingebauten Gewindestangen nachgewiesen werden.

Seit 1990 wird an der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB) verstärkt eigenständige Forschungs- und Entwicklungsarbeit insbesondere zu Fragen der Standsicherheit von Bäumen geleistet. Von U. Männl wurde 1990 und erneut 1992 in Kooperation mit der AfB ein verbessertes Auswerteverfahren der Neigungsmessung zur Standsicherheitsbestimmung von Bäumen entwickelt, vorgestellt, fortan als AfB-Methode bezeichnet und in der Praxis angewendet. Das Verfahren nach AfB / Männl erlaubt präzise Aussagen zum Kippunkt des Baumes. Als neuer



terminus technicus wurde der Begriff des Kippmoduls eingeführt. Das Meß- und Auswerteverfahren wurde zwischenzeitlich mehrfach überarbeitet und weiter verbessert.

5. Statikintegrierte Messverfahren - AfB-Methode zur Standsicherheitsüberprüfung

GRUNDLAGEN:

Für die Standsicherheit, d.h. die Sicherheit gegen das Ausheben des gesamten Baumes aus seiner Bettung, gilt das Prinzip des Gleichgewichtes von Kraft und Gegenkraft. Der von außen auf den Baum einwirkenden Windkraft wirkt die Eigengewichts- und Verankerungskraft entgegen.

Der gesunde, freistehende Baum ist in der Regel mit dem Boden, auf dem er wächst, so verwurzelt, das er selbst orkanartigen Stürmen, über Windstärke 12 hinaus, widersteht. Baum und Boden sind untrennbar miteinander verbunden. Labile Zustände entstehen durch Defekte (Eingriffe, Fäulnis, extreme Vernässung) im Verankerungssystem, d.h. der Boden-Wurzelmatrix. Das Verhältnis der Neigung des Baumes zur einwirkenden äußeren Kraft (Wind) ist ein sensibler Gradmesser der Stabilität. Höhere Neigung, bei gleicher Krafteinwirkung, bedeutet stärkere Ungleichgewichtigkeit zwischen Windlast und Gewicht- und Haltekraft, bis hin zur Kippgefährdung.

Der Kippunkt, bezogen auf die Windstärke, wird durch den Kippmodul nach Männl bestimmt. Dieser Kippmodul ergibt sich aus der Windlast, die auf den Baum wirkt, und der Reaktion auf diese Belastung, d.h. dem individuell gemessenen Neigungsverhalten. Wenn der Kippmodul den Wert 1 (= 100 %) hat, bedeutet dies, daß der Kippunkt erreicht ist und der Kippvorgang beginnt. Die Neigung beim Kippunkt ist bei jedem Baum verschieden. Da der Kippmodul nicht absolute Neigungswerte, sondern vielmehr die Änderung der Neigung unter einer Last berücksichtigt, ist seine Berechnung vom Biegeverhalten des Baumes weitgehend unabhängig.

Die AfB-Methode (AfB steht für Arbeitsstelle für Baumstatik) ist ein rechnergestütztes meßtechnisches Prognoseverfahren zur Standsicherheitsbestimmung von Bäumen. Eine auf die Windlast abgestimmte, dosierte Ersatzkraft (= Zugkraft) in Bezug zum spezifischen Neigungsverhalten des Baumes ermöglicht direkte Aussagen zur Standsicherheit, d.h. zur Sicherheit des Baumes gegen das Ausheben aus seiner Bettung. Über die windlastorientierte Neigungsmessung kann die Bedeutung von Defekten im Wurzelwerk (z.B. Wurzelkappungen, Fäulen) für die Baumstatik vergleichsweise einfach, sicher und verletzungsfrei festgestellt werden.

Die AfB-Methode beruht auf dem Zweipunkt-Meßprinzip: Der untere Meßpunkt darf nicht höher als 0,3 m, der obere nicht höher als 1,2 m liegen. Durch die Zweipunkt-Messung werden die am Stammfuß gemessenen Neigungsmesswerte nach Männl bei der Messdatenauswertung weitgehend biegungsfrei berücksichtigt und es ergibt sich gleichzeitig eine Messfehlerkontrolle.

Gemessen wird in Lastschritten. Für die Standsicherheitsprognose sind mindestens vier Meßwerte erforderlich, einer muß ≥ 30 % des Windlastmomentes bei Windstärke 12 (WLM 12) sein. In Abb. 2 der nachfolgenden Standsicherheitsauswertung sind die Meßwerte, der Biegeanteil zwischen den Meßpunkten und die Neigungskurven ersichtlich. Im Falle



unsicherer Bäume enden die Kurven bei Erreichen der kritischen Windlast. Die kritische Windlast beschreibt die Windlast, bei deren (wiederholtem) Auftreten irreversible Schäden in der Wurzel-Boden-Matrix auftreten, also der Kippvorgang eingeleitet wird. Der methodische Fehler liegt bei +/- 7 %. Die Ermittlung der kritischen Windlast erfolgt mit dem Kippmodul nach Männl.

Die Abb. 3 der nachfolgenden Standsicherheitsauswertung zeigt die Zuordnung des Kippmoduls zu den Windstärken 8 bis 12 nach Beaufort. Bei einem Kippmodul von 1 (= 100 %) ist die kritische Windlast erreicht. Da der Kippmodul eine nicht-lineare Funktion ist, muß ab einem Kippmodul von 65 bis 70 % mit einer Kippgefahr im nächstfolgenden Windstärkebereich gerechnet werden. Mit der Messung wird der status quo festgestellt. Aus den Meßergebnissen ist der Grad der Standsicherheit ersichtlich (Unterteilung in Standsicherheitsklassen, von 1 – hochgradig standsicher bis 4 - Kippgefahr).

Solange nach der Messung keine Eingriffe in das Wurzelfundament oder sonstige baumschädigende Ereignisse erfolgen, hat das Ergebnis der Standsicherheitsmessung bei hohen Sicherheitsreserven (= hochgradige Standsicherheit) eine mehrjährige Gültigkeit. Bei zwischenzeitlichen Veränderungen der Baumvitalität oder des Standortes sind unter Umständen Nachmessungen erforderlich. Das Zusammenwirken außergewöhnlicher Extrembelastungen (höhere Gewalt) soll und kann mit der Messung nicht erfaßt werden. Auch Bruchversagen wird mit der AfB-Methode nicht gemessen.

NACHFOLGEND:

- * Windlastermittlung einer etwa 150 Jahre alten Eiche mit gravierendem Lackporlingsbefall am Stammfuß (Abb. 1 = Maßstäbliche Darstellung der Baumgeometrie. Lücken in der Stammdarstellung entstehen durch Digitalisierung, sie verfälschen das Ergebnis nicht)
- * Standsicherheitsauswertung
- * Beurteilung der Messergebnisse

MESSDURCHFÜHRUNG IN STICHWORTEN:

Untersuchung des Allgemeinzustandes des Baumes, insbesondere hinsichtlich statikrelevanter Schäden Erhebung der Baum- und Standortdaten, d.h. genaue Messung der Baumhöhe, Messung des Stammumfanges, Bestimmung der Ortshöhe, Fertigen eines Polaroid-Fotos und nachzeichnen der Baumkontur im Foto Windlastermittlung im Baumstatikprogramm

Aufbau der Zugeinrichtung, d.h. Anbringen eines breiten Anschlaggurtes in einer vorher festgelegten Höhe am (je nach der Höhe der Windlast und der Anbringungsmöglichkeit), Arretierung eines Greifzuges am Widerlager (z.B. Nachbarbaum), Einbau einer Kraftmessuhr in die Zugeinrichtung, Messungen der Höhe des Anschlaggurtes im Baum und des Abstandes zum Widerlagerbaum, Messung der Höhe des Widerlagers über dem Baumstandort und Festlegen der Lastschritte (Eintrag der Daten in Messprotokoll)

Anbringen der Neigungssensoren. Die zwei Neigungsmessgeräte (Messauflösung 1/100 Grad) werden mit Stahlstiften in bestimmten Höhen fest in die Borke gedrückt (siehe Text zuvor) Messvorgang und Auswertung, d.h. Aufbringen der zuvor bestimmten Lastwerte mit dem Greifzug (Kontrolle der Höhe der Zuglast an der Kraftmessuhr). Bei Erreichen des jeweiligen Lastschrittes wird kurz eingewartet und es werden die Neigungsmessgeräte abgelesen. Nach dem letzten Lastschritt ist der Zugversuch beendet.



Die Auswertung erfolgt EDV-gestützt. Aus dem Neigungsverhalten unter zunehmender Zugbelastung ergibt sich im Auswerteprogramm das Maß für die Sicherheit gegen das Kippen des untersuchten Baumes.

6. Statikintegrierte Messverfahren - Dilatometerverfahren zur Bruchsicherheitsüberprüfung

GRUNDLAGEN UND MESSDURCHFÜHRUNG:

Das Setz-Dehnungsmeßverfahren, das auch als Dilatometerverfahren oder Elastomethode bezeichnet wird, ist ein meßtechnisches Verfahren zur Bruchsicherheitsbestimmung von Baumstämmen unter Biegebelastung. Es beruht auf dem Hook'schen Gesetz: $\sigma = E \cdot \epsilon$ (Spannung = E-Modul * Dehnung) und einem Spannungsvergleich.

Ein auf die Windlast abgestimmter Zugtest und die gleichzeitige Messung des Dehnungsverhaltens mit Setz-Dehnungsmessgeräten oder Dilatometern (Meßgenauigkeit 1/200 mm, Meßauflösung 1/1000 mm) sind Grundlage dieser Methode. Hierbei wird mit simulierter Windlast durch Zug die Dehnung bzw. Stauchung der Randfaser des Holzkörpers gemessen. Mit Hilfe des Elastizitätsmoduls (E-Modul) und der unter definierter Zuglast gemessenen Dehnung wird daraus nach dem Hook'schen Gesetz (Dehnungen verhalten sich proportional zu den Spannungen) die maximale Biegespannung (Druckspannung des grünen Holzes der jeweiligen Baumart) im Orkan (Windstärke 12) ermittelt. Durch Vergleich der minimalen Holzfestigkeit (Längsdruckfestigkeit) mit der maximalen Biegespannung im Orkan ergibt sich an der Messstelle die Sicherheit gegen Bruch.

Die minimalen Längsdruckfestigkeit des Holzes sowie der E-modul je nach Baumart, die für die Bruchsicherheitsauswertung zugrundegelegt werden, konnten aufgrund von Laboruntersuchungen (Festigkeitskatalog der Universität Stuttgart) oder in Gutachtenfällen von G. Sinn bzw. des Verfassers bestimmt werden. Die Bruchsicherheitsaussage bezieht sich auf Bruchversagen unter Biegebelastung (häufigste Bruchversagenart der Stämme und Stämmlinge freistehender Bäume im relevanten Windstärkebereich bis Windstärke 12), auf den Bereich der jeweiligen Meßstelle, die Belastungsrichtung und Windstärke 12 nach Beaufort. Außergewöhnliche Naturereignisse (höhere Gewalt) und deren Auswirkungen können durch die Messungen nicht erfaßt werden. Wegen der Unwägbarkeiten des Baumbruches ist bei den Meßergebnissen und der Aussage zur Bruchsicherheit ein Sicherheitsabstand zu berücksichtigen.

Gemessen wird i.d.R. mit mehreren Dehnungssensoren, die in Lastrichtung (Stauchung) oder in entgegengesetzter Richtung (Dehnung) am Stamm oder Stämmling angebracht sind. Ein einmaliger Zug mit geringer Zugkraft (etwa 10 % des Windlastmomentes bei Windstärke 12) genügt. Aus den Messungen kann zum Beispiel eine höhere Spannung – bedingt durch eine höhere Faserdehnung – in einem gefährdeten Querschnitt festgestellt und in einem weiteren Rechengang die Bruchsicherheit ermittelt werden. In der Regel werden zwei Stammseiten untersucht und mehrere Messungen in mehreren Höhen durchgeführt, da nach dem Aufbau der Zugeinrichtung je Messvorgang nur wenige Minuten Zeit benötigt werden und somit verletzungsfrei für den Baum ohne merklichen Mehraufwand die Bruchsicherheitswerte größerer Stammbereiche gemessen werden können.

NACHFOLGEND:



*Bruchsicherheitsauswertung für 2 Meßstellen an der Eiche (geringster Bruchsicherheitswert der Messreihe in 0,11 m Höhe)

* Beurteilung der Messergebnisse

Fazit:

Die fachlich qualifizierte visuelle Baumkontrolle ist Grundlage aller Verkehrssicherheitsbeurteilungen von Bäumen. Im Zweifelsfall –bei dem Verfasser ist das im Durchschnitt einer von 1.000 visuell geprüften Bäumen- kann eine weitergehende messtechnische Untersuchung erforderlich werden.

Beide statikintegrierten Messverfahren, sowohl das Neigungsmeßverfahren als auch das Setz-Dehnungsmeßverfahren, haben Ihre Praxistauglichkeit seit mehr als 15 Jahren in zahlreichen Gutachtenfällen an Bäumen bewiesen. Die meisten der seitdem untersuchten vorgeschädigten Bäume konnten aufgrund der hohen Aussagekraft der statikintegrierten Messverfahren unbeschritten stehen bleiben. Die statikintegrierten Messverfahren wurden seit 1980 auf wissenschaftlicher Grundlage in erster Linie aufgrund der Unzulänglichkeiten der Baumbeurteilung mit den noch immer gängigen Bohrverfahren bzw. aktuell der wenig aussagekräftigen Verfahren zur alleinigen Bestimmung des Schadensausmaßes entwickelt. Der Verfasser zum Beispiel bohrt seit 1987 keine Bäume mehr an. Die statikintegrierten Messverfahren stellen und stellen einen wesentlichen Fortschritt der messtechnischen Baumbeurteilung dar.

Ein Nachteil kann lediglich in dem höheren Aufwand der Messdurchführung sowie in der hierzu benötigten Aneignung speziellen Fachwissens durch den Messdurchführenden gesehen werden. Die Vorteile überwiegen dies bei weitem: Es sind zutreffende, da statikintegrierte Baumbeurteilungen anhand klarer und für den Fachmenschen nachvollziehbarer Zahlenwerte möglich (klare Zahlenwerte geben dem Prüfer Sicherheit in der Baumbeurteilung).

Außerdem sind die statikintegrierten Messverfahren verletzungsfrei für den Baum. Tatsächlich wurde noch keines der mit den statikintegrierten Meßmethoden erstatteten Gutachten mit Erfolg angezweifelt und die Gutachten konnten insbesondere stets helfen, so manchen hoffnungslos erscheinenden Gerichtsfall oder andere Streitigkeiten in der Stand- und Bruchsicherheitsbeurteilung von Bäumen abschließend und zutreffend zu klären. Aufgrund dieser Tatsachen werden die statikintegrierten Messverfahren von immer mehr Fachkollegen im In- und Ausland angewendet. Entsprechende Schulungen und Franchiseverträge zur selbständigen statikintegrierten Meßdurchführung werden von dem Verfasser (Arbeitsstelle für Baumstatik) angeboten.

LITERATUR:

Herbig, A., G. Sinn und L. Wessolly: Zur Standsicherheit von Bäumen im städtischen Bereich. MITTEILUNGEN DES SFB 230, Heft 1, NATÜRLICHE KONSTRUKTIONEN, Juli 1988

Männl, U.: Analyse der Standsicherheit von Bäumen. DAS GARTENAMT 6 (1992)

Männl, U., G. Sinn und Th. Sinn: Zugversuche an Bäumen - wachsender Anwenderkreis. DEUTSCHER GARTENBAU 46, November 2001 (u.a.)



Mayhead, G.J.: Some drag coefficients for british forest trees derived from wind tunnel studies. Agric. Meteorol. 12, 1973, S. 123 - 130

Sinn, G.: Standsicherheit von Bäumen. DAS GARTENAMT 31 (1982) Januar

Sinn, G.: Berechnung zur Statik von Parkbäumen. SCHRIFTENREIHE TAXATIONS=PRAXIS, Heft G 4 (1982) SVK-Verlag

Sinn, G.: Standsicherheit von Parkbäumen. DAS GARTENAMT 32 (1983) März

Sinn, G.: Standsicherheit von Bäumen und Möglichkeiten der statischen Berechnung. DAS GARTENAMT 32 (1983) September

Sinn, G.: Statische Berechnungen zur Standsicherheit von Bäumen. DAS GARTENAMT 33 (1984) Februar

Sinn, G.: Der Schadensfall - Standsicherheit von Douglasien. NEUE LANDSCHAFT 29 (1984) März

Sinn, G.: Standsicherheitsuntersuchungen von Bäumen. DAS GARTENAMT 33 (1984) September

Sinn, G.: Die Berechnungsmöglichkeit der Standsicherheit von Bäumen. WERTERMITTLUNGSFORUM 2/85

Sinn, G.: Standsicherheit von Bäumen. SCHRIFTENREIHE TAXATIONS=PRAXIS. Heft LP 15 (1985) SVK-Verlag

Sinn, G.: Kipp- und Bruchgefahr älterer Straßenbäume. SCHRIFTENREIHE TAXATIONSPRAXIS. Heft LP 15 (1985) SVK-Verlag

Sinn, G.: Standraumbedarf und Standsicherheit von Straßenbäumen - Standsicherheitsberechnung und Datenauswertung. Monographie (1985) SVK-Verlag

Sinn, G.: Methodisches Vorgehen bei der statischen Berechnung eines freistehenden schiefstämmigen Baumes. WERTERMITTLUNGSFORUM 1/86

Sinn, G.: Baumstatik und Standsicherheit. GARTEN + LANDSCHAFT 4/86

Sinn, G.: Ergebnis einer Bruchsicherheitsberechnung überlastiger Äste. DAS GARTENAMT 35 (1986) August

Sinn, G.: Die Berechnung der Standsicherheit von Bäumen auf Extremstandorten. DAS GARTENAMT 35 (1986) September

Sinn, G. und L. Wessolly: Theoretische Grundlagen der Baumstatik. DAS GARTENAMT 36 (1987) Dezember

Sinn, G.: Sachstand der Baumstatik. DAS GARTENAMT 37 (1988) März



Sinn, G. und L. Wessolly: Bau(m)statik - Zur Stand- und Bruchsicherheit des natürlichen Bauwerks "Baum". DEUTSCHE BAUZEITUNG (db), September 1988

Sinn, G. und L. Wessolly: Zur sachgerechten Beurteilung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. NEUE LANDSCHAFT 33 (1988) November

Sinn, G.: Die natürliche Konstruktion Baum. Baumstatik - statisch wirksamer Wurzelraum. DAS GARTENAMT 37 (1988) Dezember

Sinn, G. und L. Wessolly: A contribution of the proper assessment of the strength and stability of trees. ARBORICULTURAL JOURNAL, VOL. 13, NO. 1, 1. February 1989, England

Sinn, G. und L. Wessolly: Baumstatik - zwei neue zerstörungsfreie Meßverfahren. DAS GARTENAMT 38 (1989) Juli und August

Sinn, G.: Anmerkungen zur Stand- und Bruchsicherheitsüberprüfung von Bäumen durch Anbohren und Endoskopie. DAS GARTENAMT 38 (1989) August und WERTERMITTLUNGSFORUM 3/1989

Sinn, G. und L. Wessolly: Apreciation objetiva de la estabilidad y de la fragilidad de los arboles. ZONA VERDE Num. 21 Verano 1989 Spanien

Sinn, G.: Entscheidungshilfen zur Beurteilung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. WERTERMITTLUNGSFORUM 3/1989

Sinn, G.: Optische und Lasermessung der Standsicherheit von Bäumen. NEUE LANDSCHAFT 35 (1990) September

Sinn, G. und L. Wessolly: Zur Verkehrssicherheit von Bäumen: die zwei neuen zerstörungsfreien Meßverfahren. WERTERMITTLUNGSFORUM 3/1990

Sinn, G. und U. Männl: Methodische Verbesserungen und neue Meßgeräte zur Standsicherheitsüberprüfung von Bäumen. DAS GARTENAMT 39 (1990) September

Sinn, G. und Th. Sinn: Arbeitsbericht aus der Baumstatik. Kippversuche an Bäumen. Mitteilung 015 der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB). DAS GARTENAMT 40 (1991) November

Sinn, G. und Th. Sinn: Weitere Kippversuche an Bäumen. Mitteilung 016 der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB). DAS GARTENAMT 40 (1991) Dezember

Sinn, G. und Th. Sinn: Maximale Windangriffsflächen und Windlasten von Bäumen. Mitteilung 017 der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB). DAS GARTENAMT 41 (1992) Januar

Sinn, G. und Th. Sinn: Anpassungsmechanismen von Bäumen an hohe Windgeschwindigkeiten. Mitteilung 018 der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB). DAS GARTENAMT 41 (1992) März

Sinn, G. und Th. Sinn: Standsicherheit einer Allee. Mitteilung 019 der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB). DAS GARTENAMT 41 (1992) April



Sinn, G., Th. Sinn und U. Männl: Die Windlast als Bezugsgröße der Standsicherheitsbestimmung von Bäumen. Mitteilung 020 der Arbeitsstelle für Baumstatik (AfB). DAS GARTENAMT 41 (1992) Mai

Sinn, G. und Th. Sinn: Falsche Standsicherheitsbeurteilung einer Platane. Mitteilung 023 der Arbeitsstelle für Baumstatik. STADT UND GRÜN 44 (1995) Heft 12 und in DEUTSCHER GARTENBAU 40/95

Sinn, G. und Th. Sinn: Standsicherheit richtig beurteilt. Mitteilung 024 der Arbeitsstelle für Baumstatik. STADT UND GRÜN 45 (1996) Heft 9 und in DEUTSCHER GARTENBAU 37/96

Sinn, G. und Th. Sinn: Bruchsicherheit von Bäumen verschieden beurteilt. STADT UND GRÜN 46 (1997) Heft 7, Seite 512-514, Patzer-Verlag

Sinn, G. und Th. Sinn: Baumstatik - Standsicherheit und Entwicklung einer als Großbaum verpflanzten Linde. Mitteilung 026 der Arbeitsstelle für Baumstatik. STADT UND GRÜN 47 (1998) Heft 10, Seite 693, Patzer-Verlag

Sinn, G. und Th. Sinn: Baumstatik - Unvorhersehbare Kippgefahr von Bäumen und Nachweis der Sicherheiten. Mitteilung 028 (027) der Arbeitsstelle für Baumstatik. STADT UND GRÜN 47 (1998) Heft 12, Seite 851, Patzer-Verlag

Sinn, G. und Th. Sinn: Baumstatik und Bruchmechanik. Mitteilung 028 der Arbeitsstelle für Baumstatik. STADT UND GRÜN 48 (1999) Heft 3, Seite 163, Patzer-Verlag

Sinn, G., Th. Sinn und U. Männl: AfB-Methode und Inclinomethode - Zwei unterschiedliche Meß- und Auswerteverfahren zur Standsicherheitsbestimmung von Bäumen. STADT UND GRÜN 48 (1999) Heft 8, Seite 549-551, Patzer-Verlag

Sinn, G. und Th. Sinn: Zur Standsicherheit von Bäumen nach Abgrabungen und Wurzelschäden. STADT UND GRÜN 49 (2000) Heft 1, Seite 53-59, Patzer-Verlag

Sinn, G.: Baumstatik – Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft. Thalacker Medien, Braunschweig (2003)

Sinn, Th.: Zum Einfluß des Bodens auf die Standsicherheit von Bäumen. DAS GARTENAMT 42 (1993) Juli

Sinn, Th.: Biostatische Baumkontrolle - Fachgerecht, schnell und sicher. Teil 1: Pilze und ihre Bedeutung für die Baumstatik. STADT UND GRÜN 49 (2000) Heft 7, Seite 477-484, Patzer-Verlag

Sinn, Th.: Biostatische Baumkontrolle - Teil 2: Weitere eindeutige Schadsymptome und ihre Bedeutung für die Baumstatik. STADT UND GRÜN 49 (2000) Heft 9, Seite 625-633, Patzer-Verlag

Sinn, Th.: Biostatische Baumkontrolle - Teil 3: Hinweisende Symptome / Anzeichen und ihre Bedeutung für die Baumstatik. STADT UND GRÜN 49 (2000) Heft 10, Seite 702-707, Patzer-Verlag



Sinn, Th.: Baumkontrollen - Das Modell des Ingenieurbaumes und der biologische Baum. STADT UND GRÜN 50 (2001) Heft 1, Seite 58-69, Patzer-Verlag

Sinn, Th.: Belastung von Altbäumen durch den Wind. NEUE LANDSCHAFT (2003), Heft 2, Patzer-Verlag

Stoehrel, H.-P.: Zur Windlast an Bäumen. Vortragsskript AfB-Baumkolleg im Haus der Technik in Essen (1993)

Wessolly, L.: Baumstatische Analyse der Frühjahrsorkane. Neue Landschaft 36, 1991, November, S. 777 - 784, Patzer-Verlag

Wessolly, L.: Analyse der am Baum wirkenden äußeren Kräfte, deren Auswirkungen und Ableitungen für die Praxis. Vortragsskript (Kopie ohne weitere Angaben, um 1992/1993)

Wessolly, L.: Material- und Struktureigenschaften der Bäume, 15. Bad Godesberger Gehölzseminar 1992

Wessolly, L. und M. Erb: Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer-Verlag, Berlin - Hannover, 1998

ZTV-Baumpflege - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpflege. Hrsg.: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), Colmantstraße 32, 53115 Bonn (2001)

VERFASSER: Dipl.-Ing. öbv Sachverständiger Thomas Sinn Auf dem Niederberg 18 61118 Bad Vilbel