



Standssicherheit von Bäumen und Möglichkeiten der statischen Berechnung

GÜNTER SINN

(DAS GARTENAMT 32 (1983) September)

Wer sich mit Fragen der Standssicherheit von Bäumen befaßt, muß sich zunächst die Gestalt (Habitus) und das Konstruktionsprinzip des Baumes vor Augen halten. Grob gesehen unterscheiden wir, von unten nach oben, das Wurzelsystem (das überwiegend der Einsicht entzogen ist), den Stamm und die Krone.

Unter Windeinfluß wirkt die anfragende Baumgestalt hebelartig auf das Wurzelwerk, das in der Regel, da es mitwächst, durch Stütz- und Zugverankerungen Standssicherheit gewährt. Der Baum stützt sich auf den Starkwurzeln ab und wird von den seilartigen Grob- und Feinwurzeln gehalten. Physikalisch wirkt die Reaktionskraft, nämlich der Widerstand des die Wurzeln umgebenden Bodens, der sich aus Kohäsions- und Reibungskräften zusammensetzt, der Windkraft entgegen und verhindert ein Kippen.

Für die Standssicherheit kommt es also in entscheidendem Maße auf den unterirdischen Teil des Baumes und seine Funktionsfähigkeit an. Wie es damit in unseren Stadtstraßen vielfach aussieht, ist den Fachleuten hinlänglich bekannt.

Es sei beispielhaft eine Veröffentlichung von KIERMEIER in DAS GARTENAMT 30 (1981) Heft 2 erwähnt. Demnach wurden als Hauptursachen des Eichensterbens in einer amerikanischen Stadt folgende Eingriffe ermittelt:

- * Schäden durch Baumaßnahmen = 26 %
- * Überpflasterung des Wurzeltellers = 18 %
- * Aufgrabungen im Wurzelbereich = 14 %
- * Wechselnder Grundwasserstand durch Großbaugruben = 8 %
- * Ständiges Anleuchten der Krone (der Baum steht nachts nie im Dunkeln) = 4 %
- * Unsachgemäße Verwendung von Unkrautvernichtungsmitteln = 3 %
- * Parken auf dem Wurzelteller = 3 %

Der relativ hohe Anteil an Aufgrabungen im Wurzelbereich (14 %) macht die Wichtigkeit von Standssicherheitsuntersuchungen, insbesondere im Zusammenhang mit der Verkehrssicherheit, deutlich.

Befassen wir uns zunächst mit dem ungestörten Wurzelsystem des gesunden Baumes. In der gartenbaulichen Literatur finden sich nur spärliche Angaben. Daraus resultieren eklatante Fehleinschätzungen und irrige Interpretationen der Wurzelleistung und auch der Standssicherheit der Bäume. In diesem Zusammenhang sei auf die Schrift "Die Wurzeln der Waldbäume" von KÖSTER, BRÜCKNER, BIEBELRIETHER (1968) verwiesen.

Demnach wurzelt die Mehrzahl der heimischen Baumarten relativ flach. Dies gilt zum Beispiel auch für die vielfach als Tiefwurzler angesehene Stieleiche, *Quercus robur*, die nur in der Jugendphase eine Pfahlwurzel ausbildet. Ab 30 bis 50 Jahren bildet sich ein Herz-Senkerwurzelsystem. SCHOCH (1964) fand auf wechselfeuchtem Ton an über einhundertjährigen Eichen maximale Senkertiefen von 1,2 bis 1,4 m. Ähnliche Wurzeltiefen wurden auch in der Münchner Schotterebene an gleich alten Stieleichen gemessen. Auch die Linde erreicht allenfalls auf stark durchlässigen Böden größere Wurzeltiefen. Untersuchungen an 20- bis 30jährigen Winterlinden auf sandigem Lehm



ergaben Wurzeltiefen von 1,2 bis 1,3 m; an 65jährigen Winterlinden auf Lößlehm maximal 1,3 m. Ähnliche Ergebnisse werden von der Hainbuche, Esche und dem Bergahorn berichtet.

Entscheidend für die Ausprägung der Wurzeltracht sind die genetische Veranlagung der Bäume, ihre soziologische Stellung (im dichten Verband werden sie ein anderes Wurzelwerk entwickeln als im freien Stand) und die Standortverhältnisse, insbesondere die Sauerstoff- und Nährstoffversorgung, der mechanische Widerstand und die hydrologischen Bedingungen des Bodens. Die eingehende Prüfung dieser Faktoren ist Voraussetzung für eine Standsicherheitsaussage. Die schematische Darstellung einiger wesentlicher Wurzel- und Verankerungssysteme (es gibt noch zahlreiche Zwischenstufen) zeigt das natürliche Konstruktionsprinzip, das man durchaus mit technischen Systemen vergleichen kann.

Abbildung 1 zeigt ein sogenanntes Herzwurzelsystem. Es ist gekennzeichnet durch schräg wachsende Starkwurzeln und eine halbkugelige Wurzelzone. Weitreichende Hauptseitenwurzeln fehlen (Birke, Linde, Hainbuche).

Abbildung 2 zeigt ein sogenanntes Pfahlwurzelsystem. Es dominiert eine von der Stockunterseite senkrecht nach unten wachsende Hauptwurzel (Tanne, Kiefer).

Abbildung 3 zeigt ein sogenanntes Senkerwurzelsystem. Von kräftigen Hauptseitenwurzeln zweigen senkrecht nach unten wachsende Verankerungen ab (Fichte, Esche).

Abbildung 4 zeigt brettartige Aussteifungen zwischen Stamm- und Seitenwurzeln. Diese Einrichtung findet sich stark ausgeprägt bei verschiedenen Tropenbäumen, die unter Umständen auf flachgründigen, sauerstoff- und humusarmen Lateritböden wachsen und infolge ihrer mitunter beträchtlichen Höhe auf ein breit angelegtes Stützfundament angewiesen sind.

Abbildung 5 zeigt Stelzwurzeln, die infolge ihrer Grätschstellung Standsicherheit gewähren. Beispiele hierfür gibt es im Mangrovenwald, der ständigen Meeresströmungen ausgesetzt ist (Rhizophora-Arten).

Abbildung 6 möchte hinweisen auf die Stützwurzelbildung, beispielsweise des Banyan-Baumes, *Ficus bengalensis*. Unter Umständen können die Stützwurzeln sogar den zentralen Stamm ersetzen.

Die Anpassungsfähigkeit des Wurzelsystems an die Bodenverhältnisse wird ganz besonders bei den Tropenbäumen deutlich.

Aber auch die heimischen Baumarten können auf extremen Standorten völlig abweichende Wurzelsysteme entwickeln.

Es ist auffallend, daß zum Beispiel die Robinie, die sich allgemein durch ein tiefgehendes Wurzelwerk auszeichnet, in flachgründigen Böden weitreichende Seitenwurzeln entwickelt und ein tellerförmiges Wurzelsystem ausbildet.

Abbildung 7 zeigt ein Tellerwurzelsystem. Aufschlüsse über die Bodenverhältnisse sind also von eminenter Wichtigkeit für die Beurteilung des Wurzelsystems.

Zurück zur Standsicherheit und damit zu den natürlichen äußeren Einwirkungen, denen der anfragende Baum ausgesetzt ist. In erster Linie ist es die Windkraft oder Windlast (von der Schneelast wollen wir hier nicht sprechen, da sie in der Regel bei den laubabwerfenden Baumarten unserer Park- und Straßenbäume keine große Rolle spielt).

Die Windlast setzt sich aus Druck-, Sog- und Reibungswirkungen zusammen und beträgt im Regelfall

$$W = c_f \times q \times A \text{ (in kN)}$$



Dabei ist c_f der aerodynamische Lastbeiwert, der von der Form und Oberfläche des angeströmten Körpers und der Anströmrichtung abhängig ist. Für verschiedene Bauwerksformen, zum Beispiel für prismatische Baukörper, kreiszylindrische Baukörper, Fachwerke usw. gibt es in der DIN 1055, "Lastannahme für Bauten", Teil 45, der sogenannten Beiwertsammlung, entsprechende c_f -Werte. Wenn keine Analogieschlüsse möglich sind, müssen die Beiwerte im Windkanal gefunden werden.

q ist der Staudruck in kN/m^2 .

A ist die Bezugsfläche, in unserem Fall zum Beispiel die Kronenfläche in der Projektion.

Zunächst müssen wir feststellen, daß die Baumgestalt allgemein den Windeinflüssen angepaßt ist. Die Krone ist mehr oder weniger durchlässig. Die sich verengenden Äste, insbesondere aber die Zweige, sind elastisch. Die kegelförmigen Astansätze deuten auf die Anpassung an Schnee- und Windbelastung hin. Die Blätter haben strömungsgünstige Formen. Der bei den neuen Automodellen so vielgerühmte niedrige c_f -Wert (Luftwiderstandsbeiwert) wird, wie ich meine, von vielen Blattarten weit unterboten. Der zylindrische Stamm hat eine enorme Festigkeit.

Es ist einleuchtend, daß die Windgeschwindigkeit für den Druck auf ein solches Gebilde eine ausschlaggebende Rolle spielt. Und es ist auch einleuchtend, daß wir bei Standsicherheitsüberlegungen von Maximalwerten ausgehen müssen. Hier können wir die Tabellen der Baustatik zu Rate ziehen, die die Windgeschwindigkeit und den Staudruck in Abhängigkeit von der Höhe angeben.

$h =$ von 0 - 8 m, $v = 28,3$ m/s (101,88 km/Std), $q = 0,5$

$h =$ über 8 -20 m, $v = 35,8$ m/s (128,88 km/Std), $q = 0,8$

$h =$ über 20 -100 m, $v = 42,0$ m/s (151,20 km/Std.), $q = 1,1$

$h =$ Höhe über Gelände

$v =$ Windgeschwindigkeit (m/s)

$q =$ Staudruck (kN/m^2)

Solche Windgeschwindigkeiten werden lediglich von orkanartigen Stürmen erreicht. Stürme mit der Windstärke 12 haben beispielsweise eine Windgeschwindigkeit von 120 km/Std. Wesentlich höhere Windgeschwindigkeiten, nämlich bis ca. 370 km/Std., erreichen tropische Wirbelstürme (bekannt zum Beispiel als Hurrikan, Taifun, Zyklon), die Bäume wie Streichhölzer umknicken. Eine Sonderform dieser Wirbelstürme ist der Tornado, ein Gewittersturm, der auch in Europa auftreten kann.

1968 wütete eine sogenannte "Windhose" in Pforzheim, 1973 in Kiel, 1978 in Recklinghausen und in Schechingen bei Schwäbisch-Gmünd. Die Bahn der Zerstörung ist meist einige hundert Meter breit und durchschnittlich 25 km lang. In starken Tornados soll der Wirbel Geschwindigkeiten von mehr als 500, ja 800 bis 1000 km/Std. erreichen. Andere Wetterforscher sprechen von maximal 400 bis 440 km/Std.

Die Standfestigkeit oder Kippgefahr, wie man will, ist weiterhin vom Eigengewicht, der sogenannten Eigenlast des Baumes einschließlich des Wurzelfundaments abhängig, die wir als Kraft N bezeichnen wollen.

Wenn wir uns den Hebelarm des gewichtigen Baumes vor Augen halten, der von einer bestimmten Windlast angeblasen wird, so wird deutlich, daß einmal die Länge des Hebelarmes für die Standsicherheit eine Rolle spielt - wir bezeichnen diese Strecke als



Strecke 1 - und zum zweiten der Abstand vom Angriffspunkt der Kraft N, also von der Stammitte zur möglichen Kippkante. Diese Strecke bezeichnen wir als Strecke a. Die Frage ist nun: Können wir mit diesen Größen operieren?

Etwa nach der Formel: Standsicherheit n_k ist gegeben, wenn das Standmoment M_s , nämlich das Produkt aus der Eigenlast des Baumes und dem Abstand des Angriffspunktes der Kraft N zur Kippkante, größer ist als das Kippmoment M_k , nämlich das Produkt aus der Windlast und dem Abstand des Angriffspunktes der Windlast im Kronen- bzw. Stammschwerpunkt zur Ballenunterkante.

Alle Kräfte, die den Körper umzukippen drohen, bilden das Kippmoment M_k , zum Beispiel Windlast und Hebelarm. Alle Kräfte aus den ständig vorhandenen Eigenlasten wirken dem Kippmoment entgegen und bilden das Standmoment M_s , zum Beispiel Eigenlast des Baumes und Standfläche.

$$n_k = M_s / M_k = (N \times a) / (W \times l)$$

n (Eta) ist der Sicherheitsbeiwert im Grundbau.

Die Antwort lautet: Wir können die Standsicherheit dann exakt berechnen, wenn es uns gelingt,

1. die tatsächliche Eigenlast des lebenden Baumes und
2. den Winddruck auf die Krone mit Stamm zu quantifizieren,
3. eine Eingrenzung des statisch wirksamen Wurzelsystems vorzunehmen.

Die Grenzlinien liegen hier einerseits in der Abrißzone, andererseits im Knickpunkt des belasteten Wurzelsystems.

Wir wollen nun nach den gegebenen Formeln eine Beispielrechnung durchführen (Schaubild).

Wir nehmen an, daß es sich um einen freistellenden Straßenbaum handelt, der 15 m hoch ist und in der Ansicht einen kreisförmigen Kronenumriß mit einem Durchmesser von 12 m hat. Die Stammhöhe unter der Krone und der Stammdurchmesser sind in unserem Rechenbeispiel ohne Bedeutung. Der Baum stehe in einer Entfernung von 4 m an einer Häuserzeile. Zusätzlich zu früheren Abgrabungen durch Leitungs- und Rohrleitungen zu den Häusern, die beidseitig in 2 m Entfernung von der Stammitte durchgeführt wurden, sei das Wurzelsystem nunmehr durch einen Kanalgraben in 1,25 m Entfernung vom Stammittelpunkt schwer beschädigt. In 1,20 m Tiefe stehe eine Verdichtungsschicht an, die nicht durchwurzelt sei. Eine durchaus realistische Simulation. Im Zuge der Verkehrssicherheitspflicht ist die Standsicherheit zu untersuchen.

Standsicherheit (Sicherheit gegen Kippen)

$$n_k = M_s / M_k = (N \times a) / (W \times l)$$

Das Gewicht des oberirdischen Teils des Baumes sei 4 t. Wir müssen nun das Gewicht in ein Kraftmaß umrechnen. Die Maßeinheit der Kraft ist das Newton. Die Masse von einem Gramm wiegt am Ort der Normalbeschleunigung 0,00981 Newton (= 1 pond). Eine Tonne wiegt demnach 9810 Newton oder 9,81 kN (Kilonewton).

In der Baustatik wird als Umrechnungsfaktor auf 10 kN aufgerundet. 4 t sind demnach 40,00 kN.



Das Wurzelraumgewicht ergibt sich in unserem Fall nach der Formel $L \times B \times H \times$ Raumgewicht des Bodens mit $5,25 \times 4,00 \times 1,20$ m angenommen $1,8 = 18 \text{ kN/m}^3 = 453,60$ kN, Kraft N zusammen also 493,60 kN.

Die Strecke a vom Stammittelpunkt bis zur Abgrabung an der Kippkante ist 1,25 m.

Die Windlast des Stammes ist minimal und bleibt unberücksichtigt.

Die Windlast der Krone errechnet sich nach der Formel

$W_{cf} \times q \times A$ in kN

Beiwertannahme $cf = 0,6$

Staudruck q vereinfacht = $0,65 \text{ kN/m}^2$

Kronenfläche A in der Projektion nach der Formel:

$r \times r = \pi = 6,00 \times 6,00 \times 3,14 \text{ m} = 113,04 \text{ m}^2$

$W = 0,6 \times 0,65 \text{ kN/m}^2 \times 113,4 \text{ m}^2 = 44,09 \text{ kN}$

Die Strecke l von der Angriffsfläche der Windlast im Kronenschwerpunkt bis zur Unterkante des Wurzelfundamentes = 10,20 m

Wir setzen nun die Werte in die Standsicherheitsformel ein:

$n_k = (493,60 \text{ kN} \times 1,25 \text{ m}) / (44,09 \text{ kN} \times 10,20 \text{ m}) = 617,00 \text{ kNm} / 449,72 \text{ kNm}$

$n_k = \text{Faktor } 1,372$

Der Baum hat nicht mehr die von der Statik für Bauwerke geforderte 1,5fache Sicherheit. Durch orkanartige Stürme besteht Kippgefahr.

Im vorliegenden Fall sollte lediglich das Prinzip der statischen Berechnung deutlich gemacht werden.

Ich wiederhole und betone ausdrücklich, daß es entscheidend darauf ankommt, das Eigengewicht des Baumes sowie die Windlast, das heißt insbesondere den cf-Wert (Lastbeiwert) und die tatsächlich vom Wind getroffenen Baumteile und das statisch wirksame Wurzelvolumen zu quantifizieren. Nur dann sind exakte Standsicherheitsaussagen aufgrund statischer Berechnung möglich.

Literatur

- * BRÜNNING, E.: Der tropische Regenwald. Springer-Verlag, 1956.
- * DIN 1055, Teil 4: Lastannahmen für Bauten. Verkehrslasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke. Mai 1977.
- * DIN 1055, Teil 45: Lastannahmen für Bauten. Verkehrslasten, Aerodynamische Formbeiwerte für Baukörper. Entwurf Mai 1977.
- * GÖTZ, Karl-Heinz, Dieter HOOR, Karl MÖHLER, Julius NATTERER: Holzbau-Atlas. Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 1980.
- * KIERMEIER, Peter: Entwicklung von neuen Straßenbaumarten in den USA. Das Gartenamt 309 (1981) H. 2, S. 96-106.
- * KÖSTLPR, J. N., E. BROCKNER und H. BIEBELRIETHER: Die Wurzeln der Waldbäume. Verlag Paul Parey, 1968.
- * KUCHLING, Horst: Physik, Formeln und Gesetze. Buch- und Zeit-Verlagsgesellschaft, 1979.



- * LAUSCH, Erwin: Wirbelstürme, Peitschen vom Himmel. Geo Nr. 5, Mai 1979, S. 36-62.
- * LOHMEYER, G.: Baustatik. Verlag B. G. Teubner, 1980.
- * NEIZEL, Ernst: Tabellen für das Baugewerbe. Verlag Ernst Klett, 6. Aufl.
- * OTTO, Frei: Natürliche Konstruktionen. Deutsche Verlagsanstalt, 1982.
- * SINN, Günter: Berechnungen zur Statik von Parkbäumen. Schriftenreihe
Taxationspraxis. Heft G 4. Sachverständigenkuratorium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft,
Gartenbau.
- * SINN, Günter: Standsicherheit von Parkbäumen. Das Gartenamt 32 (1983) H. 3, S. 161-164.
- * WENDEHORST u. MUTH: Bautechnische Zahlentafeln. Verlag B. G. Teubner, 1981.