



Die Berechnungsmöglichkeit der Standsicherheit von Bäumen

GÜNTER SINN

(Wertermittlungsforum 2 (1985))

In Verbindung mit der Verkehrssicherungspflicht stellt sich häufig die Frage nach der Standsicherheit eines Baumes. Die größte Gefahr geht von ausgedehnten Stammschäden, insbesondere aber von Eingriffen in den Wurzelraum und der damit verbundenen Wurzeleinbuße aus. Das Wurzelsystem ist das Fundament des Baumes, das unter normalen Umständen den Erfordernissen nach Ernährung und Standsicherheit gerecht wird, weil es mitwächst.

Auf dieses Fundament und den umgebenden Boden werden die Eigenlast des oberirdischen Baumes und die von außen einwirkenden Kräfte, insbesondere die Windlast abgetragen. Unter Windeinfluß entstehen im Baum Spannungen. Die Holzfestigkeit setzt der Verformung und dem Bruch der oberirdischen Teile und der Wurzeln durch Biegung, Druck, Zug und Torsion einen Widerstand entgegen.

Gleichzeitig wirken zwischen der Wurzeloberfläche und den Bodenaggregaten Reibungs- und Adhäsionskräfte. Während die aufragende Baumgestalt mit Hebelkraft die Wurzelanläufe beansprucht, die den vertikalen Druck sowie die Biegemomente aufnehmen und eine stützende Funktion ausüben, greifen am flexiblen Teil der Starkwurzeln und an den seilartigen Grobwurzeln Zug- und Torsionskräfte an. Bei Überbeanspruchung reißen die Seilstränge und der Baum kippt. Das Gleiche passiert, wenn es durch Fehlen eines Teiles des Baumfundamentes zu einer Exzentrizität kommt.

Folgende Lasten und Kräfte stehen in einem Wirkungszusammenhang:

1. Einwirkungen auf das System Baum:

Windlast u.a. (Druck, Sog u.a.)

2. Auswirkungen im System:

Spannungen (Biege-, Zug-, Druck-, Torsionsspannung)

3. Auswirkungen außerhalb des Systems:

Reaktionskräfte (Reibung, Adhäsion der Bodenaggregate)

Die Vernetzung dieser physikalischen Vorgänge ist kompliziert und unerforscht. Die Baumstatik untersucht nicht jene Kausalzusammenhänge, sondern das Gleichgewichtsverhalten des Baumes unter dem Einfluß der geschilderten Lasten und Kräfte. Wichtigster Bestandteil der Baumstatik ist der rechnerische Standsicherheitsnachweis. Ein Baum ist dann standsicher, wenn sein Standmoment M_s größer ist als das Kippmoment M_k . Die wirksame Verankerung des Baumes im Boden in Verbindung mit seiner gesamten Eigenlast ergibt das Standmoment.

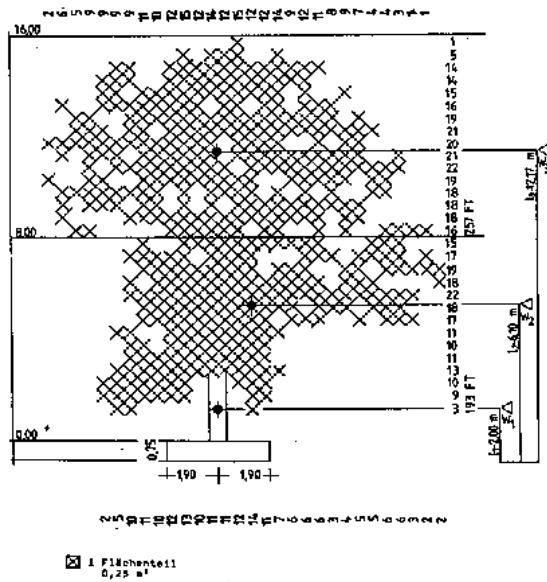
Druckkräfte, z.B. die Windlast, oder Zugkräfte in Verbindung mit dem Hebelarm der beanspruchten Fläche ergeben das Kippmoment des Baumes. Die Formel lautet:

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



(Eta (n) ist das Größenzeichen für Standsicherheit.)

GEOMETRISCHE DARSTELLUNG ZUR STATIK



Das Standmoment M_s ist das Produkt aus der Eigenlast des Baumes einschließlich seines statisch wirksamen Wurzelraumes (N = Normalkraft) und dem Abstand des Schwerpunktes bzw. Angriffpunktes der Eigenlast zur Kippkante (Strecke a).

Das Kippmoment M_k ist das Produkt aus der Windlast (W) und dem Hebelarm (Strecke l). Die Windlast (W), die sich aus Druck-, Sog- und Reibungswirkungen zusammensetzt, errechnet sich nach folgender Formel:

$$W = c_f \times q \times A$$

c_f ist der aerodynamische Lastbeiwert, der von der Form und Oberfläche des angeströmten Körpers und von der Anströmrichtung abhängig ist. Für verschiedene Bauwerksformen, z.B. für prismatische Baukörper, kreiszylindrische Baukörper, Fachwerke usw. gibt es in der DIN 1055, "Lastannahme für Bauten", Teil 45, der sog. 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 . Er kann aus Tabellen abgelesen oder nach folgender Formel berechnet werden:

$$q = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2$$

* ρ gibt die Dichte eines Stoffes an, v ist die Windgeschwindigkeit

A (vom lateinischen Wort *area* = Fläche, Ebene) ist die Bezugsfläche, in unserem Fall z.B. die Kronen- und Stammfläche in horizontaler Projektion. Gerechnet wird nach Kilonewton kN , einem Kraftmaß, das wie folgt definiert ist: Ein Newton ist die Kraft, die einer Masse von 1 kg eine Beschleunigung von 1 m/s^2 erteilt.

Die Eigenlast des Baumes ist die Beschleunigung von 10 m/s^2 (genau $9,80665 \text{ m/s}^2$), die die Masse "Baum" durch die Gravitationskraft (Schwerkraft) der Erde erfährt.

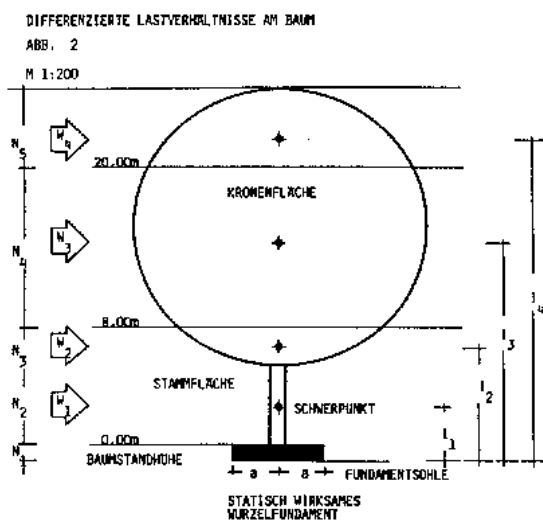
Schwerkraft $F = \text{Masse} \times 10 \text{ m/s}^2$

Ein Baum mit einer Masse von 5.000 kg wird demnach von der Erde mit einer Schwerkraft F von $5.000 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 = 50.000 \text{ N}$ (Newton) = 50 kN (Kilonewton) angezogen.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, daß der Wind in der bodennahen Schicht eine andere Geschwindigkeit hat und einen anderen Staudruck auf den Baum ausübt als beispielsweise in 25 m Höhe. Die Tabellen der Baustatik geben bei einer Windgeschwindigkeit von 28,3 m/s in 0 - 8 m Höhe einen Staudruck auf einen festen Körper von $0,5 \text{ kN/m}^2$ an, bei 38,5 m/s in 8 - 20 m Höhe einen Staudruck von $0,8 \text{ kN/m}^2$ und bei 42,0 m/s in 20 - 100 m Höhe einen Staudruck von $1,1 \text{ kN/m}^2$. Wir haben demnach je nach Größe des Baumes eine Höhenstaffelung vorzunehmen und mit unterschiedlichen Werten zu rechnen. Da die Baumkrone je nach Art und Ausbildung eine andere Dichte hat als der feste Stamm, muß auch hier noch einmal eine Unterscheidung getroffen werden.

Jede Zone stellt eine bestimmte Teilfläche dar, mit einem ihr eigenen Schwerpunkt, der gleichzeitig als Angriffspunkt des Windes angenommen wird. Um das Kippmoment zu berechnen, müssen wir nun die Windlast aus jeder Teilfläche mit der Länge des betreffenden Hebelarmes multiplizieren und die Einzelkräfte dann zur Gesamtkraft addieren. Der Quotient aus Standmoment und Kippmoment gibt Auskunft über das Maß der Standsicherheit. Als absolute Größe gilt die Zahl 1,5.

Die eigentliche Problematik der Standsicherheitsberechnung von Bäumen liegt nicht im Rechengang, sondern in anderen Bereichen. Zum einen gibt es noch keine Untersuchungsergebnisse zum Staudruck auf Bäume und es gibt keine gesicherten Beiwerte. Ein wichtiger Hinweis findet sich in einer Dissertation von R. Beckmann (1982) "Die Hausschutzhecke im Monschauer Land unter besonderer Berücksichtigung ihrer klimatischen Auswirkungen". Dort wurde festgestellt, daß die Reduktion der Windgeschwindigkeit auf der Leeseite je nach Heckendichte 50 - 80 % beträgt. Übertragen auf Bäume bedeutet dies, daß wir die übernommenen aerodynamischen Lastbeiwerte der Baustatik z.T. stark reduzieren müssen. Die Kronenausbildung spielt hierbei eine entscheidende Rolle.





ERLAUTERUNG
N - EIGENLAST
W - WINDLAST
1 - LASTARM
a - LASTARM

Eine andere Schwierigkeit liegt darin, das Gewicht des lebenden Baumes zu ermitteln. Ich rechne nach der frischen Holzmasse eines walzenförmigen Stammes, dessen Durchmesser ich unmittelbar über den Wurzelanläufen messe und dessen Länge ich je nach Ausbildung des Traggerüstes der Krone festlege. Die unberücksichtigte Stammverjüngung nach oben beinhaltet das Ast und Blattwerk. Der Wurzelstock wird in das Fundamentgewicht einbezogen.

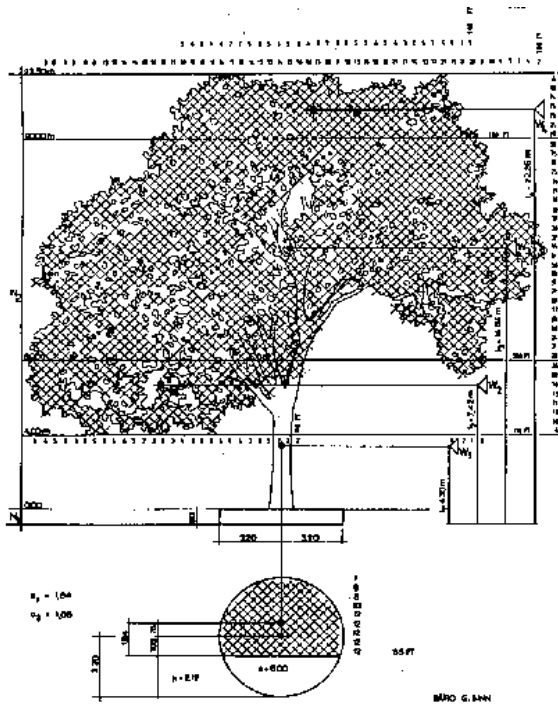
Weiterhin müssen die verschiedenen Wurzelsysteme näher erforscht werden. Wir wissen, daß die genetische Veranlagung der Bäume, ihre soziologische Stellung, die Standortverhältnisse, vor allem die Sauerstoff- und Nährstoffversorgung aber auch der mechanische Widerstand und die hydrologischen Bedingungen des Bodens von ausschlaggebender Bedeutung für die Ausprägung der Wurzeltracht sind. Bei einer Beurteilung des Baumfundamentes sind diese Faktoren einer eingehenden Prüfung zu unterziehen. Wir unterscheiden folgende Wurzelsysteme:

1. Herzwurzelsystem. Es ist gekennzeichnet durch schrägwachsende Starkwurzeln und eine halbkugelige Wurzelzone.
Weitreichende Hauptseitenwurzeln fehlen (Birke, Linde, Hainbuche)
2. Pfahlwurzelsystem. Es dominiert eine von der Stockunterseite senkrecht nach unten wachsende Hauptwurzel (Tanne, Kiefer)
3. Senkerwurzelsystem. Von kräftigen Hauptseitenwurzeln zweigen senkrecht nach unten wachsende Verankerungen ab (Fichte, Esche)
4. Tellerwurzelsystem, das Bäume auf extremen Standorten z.B. über Verdichtungshorizonten oder Grundwasser ausbilden.

GEOMETRISCHE DARSTELLUNG ZUR STATIK

Baumgattung und -art: FRAXINUS EXCELSIOR, Nr. 9
Standort: NÜRNBERGER STR. KASSEL, Ansicht: SO

X 1 Flächenteil = 0,25 m²



Vornehmlich bei verschiedenen tropischen Bäumen sind außerdem brettartige Aussteifungen zwischen Stamm- und Seitenwurzeln ausgeprägt. Oder Stelzwurzeln, die infolge ihrer Krätschstellung Standsicherheit gewährleisten (Rhizophora-Arten im Mangrovenwald). Eindrucksvoll ist auch die Stützwurzelbildung beispielsweise bei *Ficus bengalensis*. U.U. ersetzen die Stützwurzeln sogar den zentralen Stamm.

Das Wurzelsystem des gesunden Baumes ist auf natürlichen und freien Standorten morphologisch so ausgeprägt und wächst in dem Maße mit, wie es für die Ernährung und Verankerung gebraucht wird. Auch orkanartige Stürme, bis hin zu Windstärke 12 nach Beaufort (Windgeschwindigkeit 32,7 - 36,9 m/s bzw. 117,72 - 132,84 km/Std.), entwurzeln den Baum in der Regel nicht.

Bezogen auf maximale Windgeschwindigkeiten, kann 1,5 fache Standsicherheit vorausgesetzt werden (Werte aus der Baustatik), d.h. als absolute Größe der Standsicherheit gilt der Faktor 1,5 (Quotient aus Standmoment und Kippmoment). Die Werte von 1 bis 1,5 stellen Standsicherheitsreserven dar. Unter 1 hält der Baum den Windeinflüssen nur noch bedingt stand. Davon ist beim rechnerischen Nachweis auszugehen. Nach überschlägiger Ermittlung des Kippmomentes muß das Standmoment im Optimum 1,5 mal so groß sein. Dies gibt Anhaltspunkte für die Eingrenzung des statisch wirksamen Wurzelfundamentes. Nach sachverständigem Rückschluß auf das Wurzelsystem ist unter Berücksichtigung der Eigenlast des oberirdischen Baumes eine in der Tiefe und Breite möglichst realistische Ausdehnung durch Interpolation so abzustecken, daß sich 1,5 fache Standsicherheit ergibt.

Beispiel: Wenn als Kippmoment M_k (Windlast und Hebelarm) 400 kNm errechnet sind, muß das Standmoment M_s (Eigenlast des oberirdischen Baumes und des statisch wirksamen Wurzelraumes x Hebelarm) 1,5 mal so groß sein, d.h. 600 kNm betragen.

Die rechnerische Eingrenzung bzw. die tatsächliche Abrisszone liegen im näheren Umkreis des Stammes. Durch Messungen an entwurzeltten Bäumen kann dies bestätigt werden. So



erklärt sich auch, daß Bäume an Stadtstraßen, trotz beengten Standraumes und oft geringer Wurzeltiefe standsicher sind. Die Reduzierung der Standsicherheit durch Eingriffe in den Wurzelraum wird bei der statischen Berechnung als Relativwert dargestellt.

Die Flächenberechnung der Baumkrone zur Ermittlung der Windlast setzt eine genaue Erfassung des polymorphen Baumes voraus. Es genügt nicht, z.B. die Baumkrone als geometrische Fläche - Kreis, Rechteck, Trapez usw. -- darzustellen und zu berechnen. Die Flächenberechnung muß sich an der Wirklichkeit orientieren. Da aufwendige photogrammetrische Aufnahmen mit sog. Präzisionsmesskammern, die eine maßstabgerechte Wiedergabe gewährleisten, aus Kostengründen ausscheiden, muß insbes. für die Kronenflächendarstellung eine praktikable, relativ einfache Methode gefunden werden. Eine Möglichkeit besteht darin, den Baum mit einem Theodoliten oder Hypsometer (Baumhöhenmesser) zu vermessen, möglichst verzerrungsfrei zu fotografieren und den Bildabzug mit einem Antiskop maßstabgerecht zu reproduzieren.

Im Antiskop, das im Grunde nichts weiter ist als ein Front-Episkop, wird Licht auf die Bildvorlage gestrahlt, von dort diffus ins Objektiv reflektiert, gebündelt und über den Abbildungsspiegel senkrecht auf Rasterpapier geworfen. Durch Veränderung des Projektionsabstandes kann der Abbildungsmaßstab eingestellt werden. Die vertikale Projektion auf eine Zeichenplatte ermöglicht das direkte Auszeichnen der Kontur des Baumes.

Bei freistehenden Bäumen kann das Verfahren fototechnisch wesentlich vereinfacht werden. Das Bildnegativ wird direkt auf Rasterpapier vergrößert, die Zeichenarbeit entfällt. Bei einer Vergrößerung auf das Format im Maßstab 1 : 100 können z.B. bei einer 5 mm-Rasterung 0,25 m² große Flächenteile ermittelt werden, die in der Addition die Windangriffsfläche des Baumes ergeben.

Ich möchte diese theoretischen Ausführungen mit folgenden Sätzen beenden: In einzelnen Teilbereichen der Baumstatik sind wir auf plausible theoretische Annahmen angewiesen, weil die Komplexität der Sache noch keine eindeutige Beweisführung zulässt. Es wäre töricht, auf eine totale wissenschaftliche Absicherung der Kausalzusammenhänge zu warten. Der Vorwand, wir wissen zu wenig, hat niemals in der Geschichte eine Sache bewegt. Im Grunde wissen wir viel, wir müssen die Einzelerkenntnisse nur in den richtigen Zusammenhang bringen.