

# Auslegung von Gebäudestrukturen gegen Baumwurf

Dr.-Ing. F.-H. Schlüter VDI, Karlsruhe

Dipl.-Ing. M. Gerold, Karlsruhe

## Zusammenfassung

Bei der Bemessung von Gebäudestrukturen wird ein mögliches Umfallen von Bäumen i.d.R. nicht betrachtet. In den relevanten Vorschriften sind hierzu keine Angaben enthalten. In den letzten Jahren wurden jedoch zunehmend Neubauten in unmittelbarer Nähe von alten Baumbeständen errichtet. Vor diesem Hintergrund wird ein Vorschlag unterbreitet, wie der Lastfall „Baumwurf“ im Rahmen von bautechnischen Nachweisen betrachtet werden kann. Aufbauend auf ein dynamisches Modell für die Einwirkung werden nichtlineare Finite-Element-Analysen und daraus abgeleitete einfache Bemessungsmodelle für die Praxis vorgestellt.

## 1 Problemstellung

Die Bemessung von Gebäudestrukturen für einen Lastfall „Baumwurf“ wird i.d.R. kaum betrachtet. In den relevanten Vorschriften zu den Lastannahmen – Reihe DIN 1055 bzw. EC1 – sind hierzu keine Angaben enthalten. Dies liegt wohl auch daran, dass in der Vergangenheit bei den meisten Bauvorhaben ein solcher Lastfall gar nicht auftreten konnte. So sahen Landesbauordnungen vor, dass Gebäude einen Abstand von mindestens 30 m von Wäldern haben müssen. In den letzten Jahren wurden diese Grundsätze jedoch aufgeweicht und Neubaugebiete zunehmend in unmittelbarer Nähe von alten Baumbeständen erschlossen oder Erweiterungen von bestehenden Gebäuden ausgewiesen. Nicht zuletzt aufgrund des Orkans „Lothar“ im Dezember 1999, findet nunmehr eine Diskussion von möglichen Schadensszenarien (vgl. Bild 1) und deren Verhütung statt ([8], [11]). Auch die Versicherungswirtschaft hat hieran aufgrund des hiermit verbundenen hohen Schadenspotentials ein Interesse.

Ein bei einem Sturm umstürzender Baum wird in der Bevölkerung als unabwendbares Naturereignis ähnlich wie Blitzschlag oder Erdbeben betrachtet. Bei Letzterem wurde durch entsprechende Auslegung der Bauwerke Vorsorge getroffen. Ziel der nachfolgenden Ausführungen ist in erster Linie der Schutz der Bewohner in baulichen Anlagen vor umstürzenden Bäumen (vgl. § 3 MBO [1]). Die Beschädigung von Gebäudeteilen sowie Sachbeschädigung

gen, z.B. in Folge ggf. durch Fenster oder Dächer durchschlagende Äste oder großer Verformungen einzelner Bauteile, sind bei solch einem Ereignis mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit sekundär und werden hier nicht näher betrachtet. Müssen in besonderen Fällen höhere Anforderungen an die Funktionstüchtigkeit gestellt werden, so sind weitergehende Maßnahmen im Einzelfall festzulegen.



Bild 1: Ein infolge des Orkans „Lothar“ auf ein Wohnhaus gestürzter Baum; teilweise herausgerissener Wurzelstock, Schäden am Dachstuhl

Das außergewöhnliche Ereignis „Baumwurf“ ist hinsichtlich der Auslegungsphilosophie ähnlich zu behandeln wie ein Ereignis "Erdbeben" oder "Anprall". Die Auftretenswahrscheinlichkeit dieses Ereignisses in Kombination mit ungünstigst wirkenden Einflussgrößen ist sehr gering. Das tatsächliche Verhalten wird bestimmt von einer Vielzahl nicht eindeutig im voraus zu bestimmender Parameter (vgl. Kap. 2). Hier kann nur eine pragmatische Vorgehensweise mit Berücksichtigung der wesentlichen Effekte zum Ziel führen. Die Kombination aller ungünstigst wirkenden Einflüsse soll hier nicht betrachtet werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Bruch- und Belastungsszenarien

In [7] und [10] wurde versucht, die Stoßenergie des auftreffenden Baumes für konkrete Einzelfälle in Abhängigkeit vom Abstand des Baumes zum Gebäude, von Baumart und -höhe, vom Stammdurchmesser, Fallwinkel und Windverhältnissen anzugeben. Die dort getroffenen Ansätze sind jedoch im Hinblick auf ein allgemeines und in der Praxis leicht anwendbares Berechnungsmodell nur bedingt geeignet.

Zur Bestimmung eines Lastansatzes müssen verschiedene mögliche Szenarien beim Bruch und Umsturz eines Baumes betrachtet werden. Wie bereits angedeutet, hängt das tatsächliche Verhalten von zahlreichen Parametern ab wie

- Wuchseigenschaften des Baumes (Stammausbildung, Kronenausbildung, Lage und Ausbildung von Ästen, Schräglage)
- Ausbildung des Wurzelstockes
- Bodenverhältnisse (bzw. Ertragsklasse nach [9])
- Windverhältnisse vor und während des Umsturzes
- Luftwiderstand der Krone beim Fall
- Jahreszeit und Witterungsverhältnisse (belaubter Baum, Eisansatz etc.)
- Lage und Widerstand eines möglichen Bruchgelenkes
- Art und Ausbildung der beaufschlagten Gebäudestrukturen (Dachfläche, Kniestock, Pfetten, Einzelbauteile); Widerstand und Massenverhältnisse
- Lage des Aufprallpunktes

Diese Aufzählung macht deutlich, dass viele der Parameter nicht mit der notwendigen Genauigkeit im voraus angegeben werden können. Zur Verdeutlichung sind beispielsweise in Bild 2 zwei möglich Bruchszszenarien wiedergegeben: Holzbruch des Stammes im bodennahen Bereich sowie in halber Baumhöhe. Des Weiteren sind häufig Entwurzelungen zu beobachten, bei denen der Stamm nicht bricht, sondern sich ein Grundbruch im Bereich des Wurzelstockes einstellt. Einen wesentlichen Einfluss haben auch die Windverhältnisse. So ist es möglich, dass eine einzige kurze Windböe den Bruch des Baumes bzw. des Wurzelstockes bewirkt oder aber bei länger andauernden und wiederholten Windböen der Baum selbst zu Schwingungen angeregt wird (möglicherweise mit Resonanzerhöhungen). Dies führt infolge der gespeicherten Verformungsenergie und den beschleunigten Massen zusammen mit der direkten Windbelastung zum Bruch. Der Fallvorgang wird bestimmt durch die Anfangsgeschwindigkeit, die aktivierten Widerstände wie z.B. Drehfeder des brechenden Stammes oder Wurzelstockes sowie den Luftwiderstand der Krone. Letzterer ist wiederum abhängig von den vorherrschenden Windgeschwindigkeiten und -richtungen. Im Extremfall wird die Krone während des Fallens noch vom Wind beschleunigt.

Die Versagensart und die Verhältnisse beim Fallvorgang sind im Detail kaum vorhersehbar. Die Erfassung aller Mechanismen und Beschreibung in einem komplizierten Berechnungsmodell ist nicht sinnvoll. Es würde eine Genauigkeit vorgetäuscht, die angesichts der vielen freien und kaum bestimmbar Parameter nicht gegeben wäre.



Bild 2: Mögliche Bruchvorgänge bei einem Baumwurf

Für eine praktikable Handhabung und Herleitung eines Berechnungsmodells müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden, die die Verhältnisse für die komplexen Vorgänge in den meisten Anwendungsfällen hinreichend beschreiben. Für die weiteren Betrachtungen wird daher von folgenden Grundannahmen ausgegangen:

- Die Energie eines Baumes beim Aufprall wird bestimmt aus seiner effektiven Masse und einer Anfangsgeschwindigkeit.
- Rechnerisch wird angenommen, dass sich ein Baum beim Fallvorgang am Stammfuß frei dreht (Gelenk). Die positive Wirkung einer Drehfeder am Wurzelstock bzw. beim Bruch des Stammes wird später pauschal berücksichtigt.
- Die Geschwindigkeit des Baumes beim Aufprall wird analog zum freien Fall ohne belastende oder bremsende Wirkung des Windes bzw. der Luft ermittelt.
- Es wird immer der voll belaubte Baum betrachtet. Die Masse aus Schnee- und Eisansatz am unbelaubten Baum im Winter entspricht näherungsweise der jährlich absterbenden Baumteile, so dass immer die Masse des im Sommer voll belaubten Baumes der Rechnung zugrunde gelegt werden kann.
- Verformungen des Baumstammes beim Stoßvorgang sind vernachlässigbar bzw. werden pauschal berücksichtigt.
- Eine Abbremsung der Baumkrone erfolgt durch elasto-plastische irreversible Deformation der Baumkrone beim Stoßvorgang durch Verbiegen und Brechen der Äste.

- Der Energieverzehr beim Bruchvorgang und während des Aufpralles wird über einen pauschalen Reduktionsfaktor berücksichtigt
- Die elastischen Verformungen der Gebäudestruktur bei Anprall sind vernachlässigbar.

## 2.2 Verwendete Bezeichnungen

In den folgenden Ausführungen und Herleitungen verwendete Bezeichnungen sind im Einzelnen:

$h_0$	Höhe des Baumes
$h_s$	Schwerpunkthöhe des Stammes (Index s)
$h_K$	Schwerpunkthöhe der Krone (Index k)
$d_K$	Durchmesser der Krone
$d_{s,m}$	Mittlerer Durchmesser des Stammes
$m_s$	Masse des Stammes
$m_K$	Masse der Krone
$\gamma_K$	spezifisches Gewicht der Krone
$\gamma_s$	spezifisches Gewicht des Stammes
$h_B$	Höhe des Auftreffpunktes
$\alpha$	Winkel zwischen der Horizontalen und der Baumachse beim Aufprall
$v_{0,max}$	maximale Geschwindigkeit der Baumspitze bei freiem Fall ( $\alpha=90^\circ$ )
$v_0$	Geschwindigkeit der Baumspitze
$v_B$	Effektive Geschwindigkeit des Ersatzsystems beim Aufprall
$a$	Angenommene konstante Beschleunigung der Baummasse während des Falles
$g$	Erdbeschleunigung ( $g \cong 10 \text{ m/s}^2$ )
$m_B$	Effektive Masse des Ersatzsystems
$h_B$	Höhenlage der Masse des Ersatzsystems (=Auftrittspunkt)
$E_B$	Energie des Ersatzsystems
$E_{B,eff}$	Effektive Energie des Ersatzsystems ( $E_B$ abgemindert mit $\eta_{Diss}$ )
$\eta_{Diss}$	Abminderungsfaktor zur globalen Berücksichtigung nicht im Einzelnen erfasster dissipativer Effekte
$R_B$	Federkraft des Ersatzsystems für die Einwirkung
$R_{B,max}$	Maximale Federkraft des Ersatzsystems (=Abbremskraft)
$u_B$	Verformung der Feder des Ersatzsystems
$u_{B,max}$	Maximale Verformung der Feder des Ersatzsystems (=Abbremsweg)
$\beta_{Dyn}$	Stoßfaktor zur Berücksichtigung der dynamischen Wirkung bei einem Kraft-Zeit-Verlauf
$S_{stat}$	Statische Ersatzkraft für die Bemessung des Bauteiles
$E_{Feder}$	Aufnehmbare Energie der Feder des Ersatzsystems
$E_{Struktur}$	Aufnehmbare Energie der getroffenen Struktur

### 2.3 Charakteristische Kenngrößen von Bäumen

Die Wuchseigenschaften von Bäumen können näherungsweise aus [9] entnommen werden. Ausgehend von der Baumart, der Bodenbeschaffenheit und der gemessenen bzw. geschätzten Geometrie der Bäume kann deren voraussichtliches Wachstum in den nächsten 50 Jahren (Rechnerische Nutzungsdauer der Gebäude) angegeben werden.

In Tabelle 1 bis 3 sind beispielsweise die Ertragstabellen für Buche, Eiche und Fichte wiedergegeben. Mit den Werten aus den Tabellen können Geometrie und Masse der zu untersuchenden Bäume als Eingangsgröße für eine dynamische Berechnung ermittelt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den angegebenen Werten  $h_{s,m}$  und  $d_{s,m}$  um prognostizierte Mittelwerte im Hinblick auf den Ernteertrag eines flächigen Waldbestandes handelt. Das tatsächliche Wachstum kann naturgemäß hiervon abweichen, insbesondere beim freistehenden Baum. Zwischenwerte können interpoliert werden.

**Tabelle 1:** Ertragstafel Buche / Linde / Kastanie (Auszug aus [9], Ertragsklassen 1 bis 10)

Buche	Boden-Ertragsklasse 7 dGz <sub>100</sub>			Boden-Ertragsklasse 9 dGz <sub>100</sub>		
	Mittel- höhe [Jahre] $h_{s,m}$ [m]	Ober- höhe $h_0$ [m]	Mittel- durchmesser <sup>1)</sup> $d_{s,m}$ [cm]	Mittel- höhe $h_{s,m}$ [m]	Ober- höhe $h_0$ [m]	Mittel- durchmesser <sup>1)</sup> $d_{s,m}$ [cm]
30	7,5	9,0	4,7	10,4	12,2	6,2
50	15,8	17,6	11,9	20,3	21,9	14,4
80	24,7	26,0	23,3	30,1	31,1	27,8
100	29,1	30,1	31,0	34,8	35,3	37,3
120	32,3	33,1	38,9	38,5	38,6	46,6
150	35,7	36,1	50,2	42,2	42,2	60,5

<sup>1)</sup> wird 1,30 m über OK Gelände gemessen

**Tabelle 2:** Ertragstafel Eiche / Hainbuche / Ulme (Auszug aus [9], Ertragsklassen 1 bis 9)

Eiche	Boden-Ertragsklasse 5 dGz <sub>100</sub>			Boden-Ertragsklasse 7 dGz <sub>100</sub>		
Alter [Jahre]	Mittel- höhe h <sub>S,m</sub> [m]	Ober- höhe h <sub>0</sub> [m]	Mittel- durchmesser <sup>1)</sup> d <sub>S,m</sub> [cm]	Mittel- höhe h <sub>S,m</sub> [m]	Ober- höhe h <sub>0</sub> [m]	Mittel- durchmesser <sup>1)</sup> d <sub>S,m</sub> [cm]
30	8,9	10,3	6,7	13,5	15,2	8,9
50	14,6	16,3	13,6	19,2	20,4	16,6
80	20,2	21,3	23,6	24,7	25,3	27,4
100	22,8	23,6	30,4	27,4	27,8	34,7
120	24,9	25,5	37,2	29,5	29,7	42,1
150	27,2	27,6	47,3	31,8	31,9	53,3
200	29,8	30,0	62,7	34,3	34,3	71,5

<sup>1)</sup> wird 1,30 m über OK Gelände gemessen

**Tabelle 3:** Ertragstafel Fichte / Weymouthkiefer / Sitkafichte (Auszug aus [9], Ertragsklassen 1 bis 16)

Fichte	Boden-Ertragsklasse 7 dGz <sub>100</sub>			Boden-Ertragsklasse 12 dGz <sub>100</sub>		
Alter [Jahre]	Mittel- höhe h <sub>S,m</sub> [m]	Ober- höhe h <sub>0</sub> [m]	Mittel- durchmesser <sup>1)</sup> d <sub>S,m</sub> [cm]	Mittel- höhe h <sub>S,m</sub> [m]	Ober- höhe h <sub>0</sub> [m]	Mittel- durchmesser <sup>1)</sup> d <sub>S,m</sub> [cm]
30	5,9	7,4	7,2	11,5	14,0	11,5
50	12,5	15,1	12,5	21,0	23,4	19,3
70	18,4	20,9	17,5	27,3	29,0	26,8
90	22,6	24,8	22,5	31,6	32,8	34,1
110	26,0	27,8	27,4	34,7	35,7	40,9
130	28,9	30,4	32,0	37,1	38,0	47,2

<sup>1)</sup> wird 1,30 m über OK Gelände gemessen

Abhängig vom Alter der Bäume ist u.a. die Oberhöhe  $h_0$  sowie der mittlere Stammdurchmesser  $d_{S,m}$  angegeben. Die Krone (Index  $k$ ) der Bäume wird für die vorliegenden Untersuchungen als idealisierte Kugel angenommen (vgl. Bild 3).

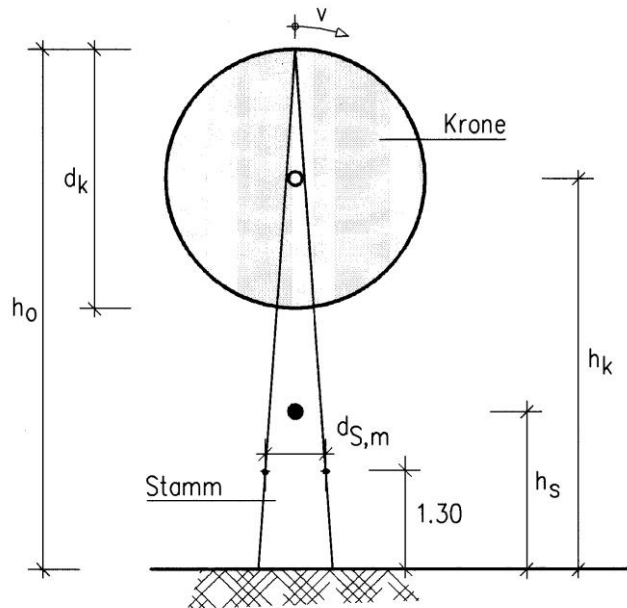


Bild 3: Idealisierter Baum: Krone als Kugel, Stamm als Kegel

Deren ideeller Durchmesser und spezifisches Gewicht können näherungsweise angenommen werden mit

$$d_K \approx h_0/2$$

$$\gamma_K = 0,006 \text{ kN/m}^3 \quad \text{bei Kronen von Bäumen aus Nadelholz}$$

$$\text{bzw. } = 0,008 \text{ kN/m}^3 \quad \text{bei Kronen von Bäumen aus Laubholz}$$

Der Stamm (Index S) wird als Kegel der Höhe  $h_0$  betrachtet. Der Stammdurchmesser auf Schwerpunkthöhe  $h_s$  wird, auf der sicheren Seite liegend, zu dem in den Ertragstabellen in 1,30 m über Gelände ermittelten Wert  $d_{S,m}$  angenommen. Das spezifische Gewicht wird nach DIN 1055 angesetzt zu

$$\gamma_S = 6,00 \text{ kN/m}^3 \quad \text{bei Nadelbäumen und}$$

$$\gamma_S = 8,00 \text{ kN/m}^3 \quad \text{bei Laubbäumen.}$$

Damit ergeben sich die folgenden Größen für Massen und Schwerpunktlagen:

$$m_K = \frac{1}{6} \pi \cdot d_K^3 \cdot \frac{\gamma_K}{g} \cong 0,52 \cdot d_K^3 \cdot \frac{\gamma_K}{g} \quad (2.1)$$

$$h_K = \frac{3}{4} \cdot h_0 \quad (2.2)$$



$$m_s = \frac{1}{4} \pi \cdot d_{s,m}^2 \cdot \frac{\gamma_s}{g} \cdot h_0 \quad (2.3)$$

$$h_s = \frac{1}{3} \cdot h_0 > 1,30 \text{ m} \quad (2.4)$$

### 2.3 Fallgeschwindigkeit von Bäumen

Für das dynamische Modell ist neben den geometrischen Eingangsgrößen die Geschwindigkeit zu Beginn des Aufpralls von entscheidender Bedeutung. Zur Ermittlung dieser Geschwindigkeiten wurden von den Autoren Fallgeschwindigkeiten von Bäumen, welche mit Motorsägen gefällt wurden, gemessen. Tabelle 4 zeigt die verschiedenen Bäume, ihre Längen sowie die zugehörigen gemessenen Fallzeiten.

**Tabelle 4:** Gemessene Fallgeschwindigkeiten und Größen von Bäumen

Baumart	Baumhöhe $h_0$ [m]	Fallzeit $t$ [s]	Fallgeschwindigkeit $v_{0,max}$ [m/s]	Beschleunigung $a$ [ $m/s^2$ ]
Obstbaum	15	2,7	17,4	6,4
Buche	30	4,0	23,5	5,9
Ahorn	30	3,7	25,4	6,8
Eiche	40	4,2	29,9	7,1
Mittelwert	28,8	3,5	25,3	6,6

Zur Bestimmung der relevanten Geschwindigkeiten wurde vorausgesetzt, dass vom Beginn des Baumwurfes bis zum Auftreffen auf dem Boden, d.h. für den maximalen Fallwinkel von  $90^\circ$ , eine konstante Beschleunigung vorliegt, ähnlich wie beim freien Fall einer Masse. Die Spitze des Baumes beschreibt dabei einen Kreisbogen mit dem Radius  $h_0$  und legt die Strecke  $s_{max} = 1/2 \pi h_0$  zurück (vgl. Bild 4). Der genaue zeitliche Verlauf der Geschwindigkeit kann nicht vorherbestimmt werden, da er von sehr vielen Parametern abhängt, wie z.B. Beschaffenheit und Luftwiderstand der Krone, Windgeschwindigkeit und -richtung während des Baumwurfes, Schrägwuchs des Baumes, Versagensart des Stammes oder Wurzelwerkes. Beim Ansatz einer konstanten Beschleunigung nimmt die Geschwindigkeit der Baumspitze linear mit der Zeit bis zum Aufprall zu. Die getroffene Annahme ist plausibel und dürfte unter

Berücksichtigung des probabilistischen Charakters des hier diskutierten Problems für die meisten Fälle auf der sicheren Seite liegen.

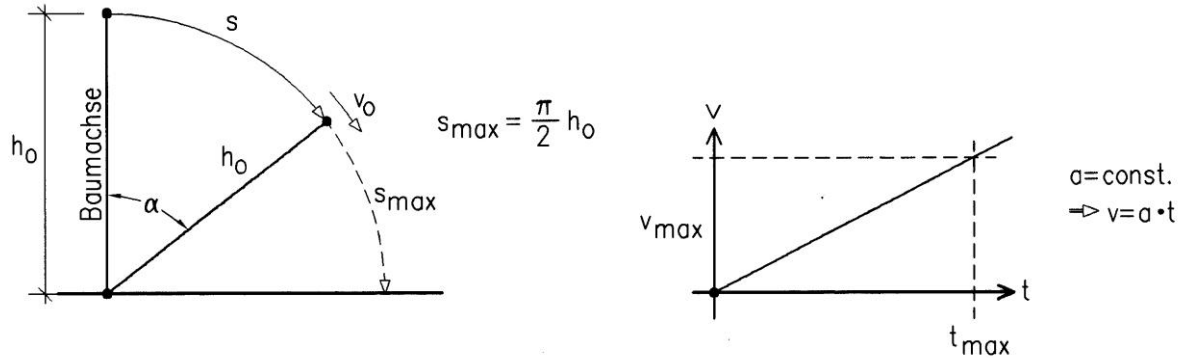


Bild 4: Bewegungsmodell eines Baumes beim Fall

Bei Ansatz der Vereinfachung  $a = \text{const.}$  ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$v = a \cdot t \tag{2.5}$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \Rightarrow a = \frac{2s}{t^2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2s}{a}} \tag{2.6}$$

Mit  $s_{\max} = \frac{1}{2} \pi h_0$  und den gemessenen Fallzeiten  $t_{\max}$  folgt

$$a = \frac{h_0 \pi}{t_{\max}^2} \tag{2.7}$$

Als Mittelwert der beobachteten Baumfallzeiten (vgl. Tab. 4) kann für die weitere Betrachtung unabhängig von Baumart und Größe ein Wert von

$$a = 7 \text{ m/s}^2 \quad \text{entsprechend 70\% der Erdbeschleunigung}$$

angenommen werden. Dieser Wert ist kleiner als die Erdbeschleunigung  $g$  und erfasst offensichtlich die Windverhältnisse vor und während des Umsturzes sowie den Luftwiderstand der Krone beim Fall.

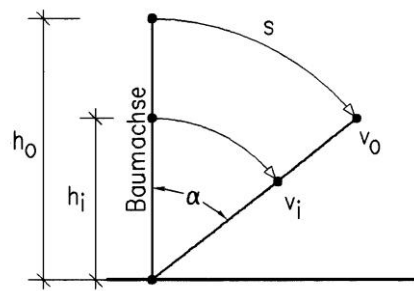
Damit kann nach Gl. (2.5) für jede Zeit  $t$  die zugehörige Geschwindigkeit  $v_0$  ermittelt werden. Für die Berechnung einer bestimmten Aufprallsituation, definiert durch den Winkel  $\alpha$  (vgl. Bild 4), ist zu bestimmen, welche Strecke  $s$  die Baumspitze vom ursprünglichen Zustand bis zum Auftreffen zurückgelegt hat. Die dabei benötigte Zeit  $t$  ergibt sich aus Gl. (2.6).

$$s(\alpha) = h_0 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\alpha}{90^\circ} \quad (2.8)$$

$$v_0(\alpha) = \sqrt{2 \cdot a \cdot s(\alpha)} \quad (2.9)$$

Die Gl. (2.9) bestimmt die Geschwindigkeit der Baumspitze mit der Höhe  $h_0$ . Die Geschwindigkeiten anderer Orte  $h_i$  entlang der Baumachse berechnen sich aus

$$v_i = \frac{h_i}{h_0} v_0 \quad (2.10)$$



### 3 Allgemeines dynamisches Ersatzsystem der Einwirkung für den Lastfall „Baumwurf“

#### 3.1 Einwirkende Energie

Beim Baumwurf handelt es sich um einen komplexen dynamischen Vorgang mit vielen unbekanntem Parametern, wie z.B. Bruchvorgänge im Wurzelwerk, im Stamm und/oder in der Krone. Eine genaue Analyse dieser Vorgänge ist praktisch nicht möglich. Für die Bemessung soll daher ein einfaches Ersatzsystem gewählt werden, dass die wesentlichen Effekte berücksichtigt. Wie in Kap. 2 beschrieben, wird unterstellt, dass sich der Baum beim Bruchvorgang um einen Drehpunkt auf Geländeneiveau frei drehen kann. Der Stamm wird als starre Achse angenommen, auf der die Massen für die Krone und das Stammholz in den entsprechenden Höhen  $h_K$  und  $h_S$  angeordnet sind (Bild 5) und sich mit den Geschwindigkeiten  $v_K$  bzw.  $v_S$  bewegen. Die Situation beim Aufprall ist je nach örtlicher Gegebenheit unterschiedlich. Die Kontaktstelle wird beschrieben durch den Winkel  $\alpha$  und die Höhe  $h_B$  (vgl. Bild 6).

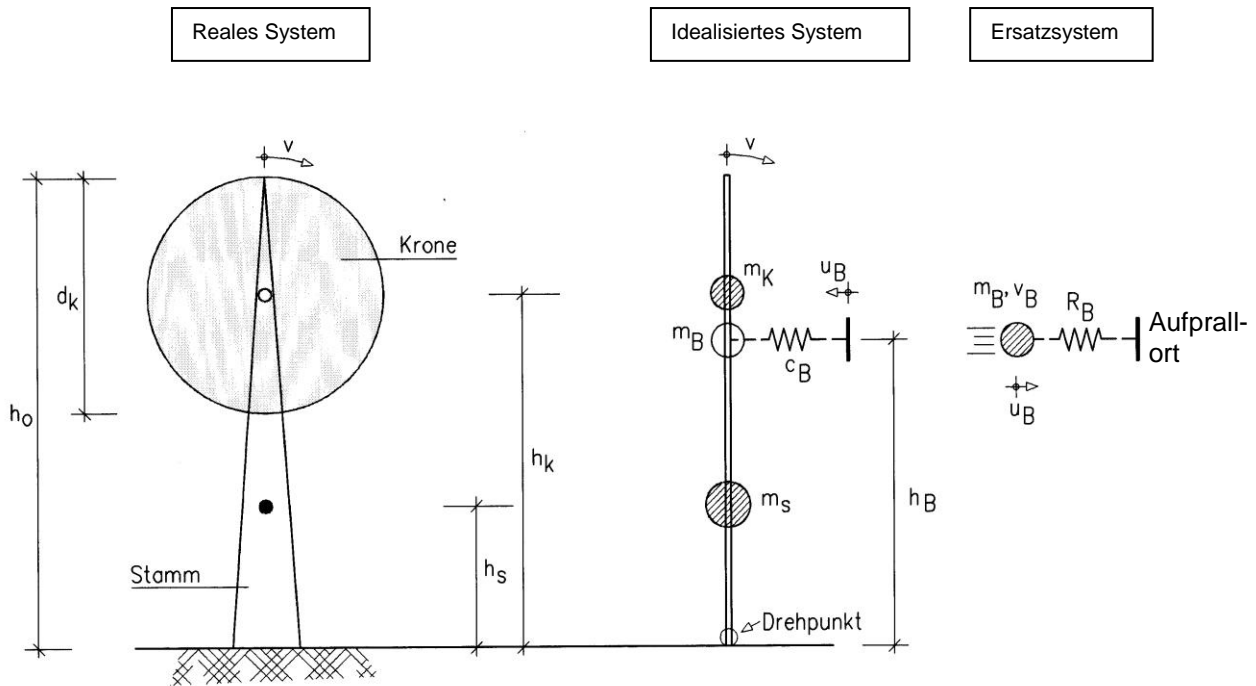


Bild 5: Modellbildung für die Einwirkung „Baumwurf“

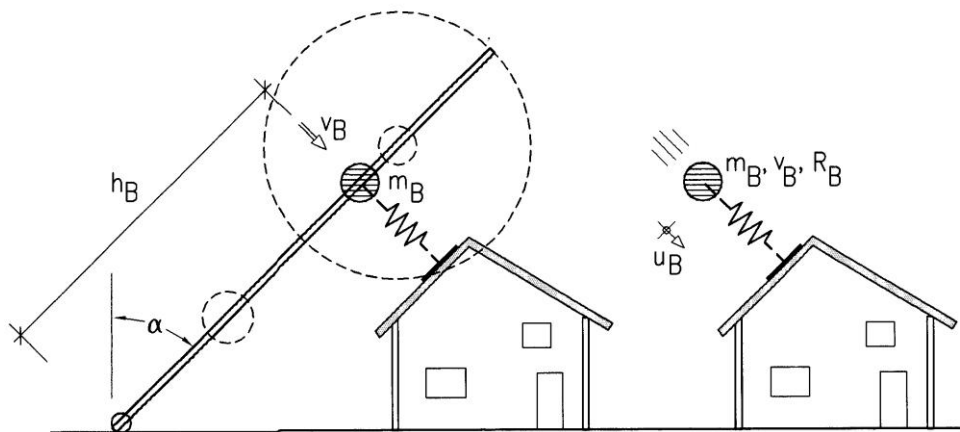


Bild 6: Rechenmodell eines Einmassenschwingers zur Beschreibung des Baumwurfes auf ein Haus

Als Ersatzsystem der Einwirkung soll ein Einmassenschwinger mit der effektiven Masse  $m_B$ , der Anfangsgeschwindigkeit  $v_B$  und der Federcharakteristik  $R_B$  gewählt werden. Aus der Bedingung, dass die kinetische Energie des Originalsystems und des Ersatzsystems gleich ist, ergibt sich folgende Beziehungen

$$E_{Kin} = \frac{1}{2} m v^2 \tag{3.1}$$

$$\frac{1}{2} m_B v_B^2 = \frac{1}{2} m_S v_S^2 + \frac{1}{2} m_K v_K^2 \quad (3.2)$$

$$\Rightarrow m_B = \frac{m_S h_S^2 + m_K h_K^2}{h_B^2} \quad (3.3)$$

$$v_B = \frac{h_B}{h_0} \cdot v_0(\alpha) \quad (3.4)$$

$$E_B = \frac{1}{2} m_B v_B^2 \quad (3.5)$$

Zur Berücksichtigung von energiedissipierenden Effekten beim Aufprall, die nicht im Einzelnen erfasst werden können, wird ein globaler Abminderungsfaktor  $\eta_{Diss}$  eingeführt. Mit ihm wird die effektive Energie

$$E_{B,eff} = \eta_{Diss} \cdot E_B \quad (3.6)$$

bestimmt, die den Berechnungen zugrunde liegt.

Zur Erfassung einer Fußpunkteinspannung sowie bei genauer Berücksichtigung der Wuchseigenschaften des Baumes kann - nach Ansicht der Verfasser - je nach örtlicher Situation ein Grundwert des Energiedissipationsfaktors abgeschätzt werden zu

$$\eta_{0,Diss} = 0,6 \text{ bis } 0,8$$

Weitere pauschale Abminderungen sind möglich. Hierzu werden in [5] weitere  $\eta$ -Werte vorgeschlagen, die teilweise aus den Erkenntnissen durchgeführter FE-Vergleichsrechnungen abgeleitet wurden.

### 3.2 Belastungsszenarien und Nachweise

Der Nachweis muss nun in der Form erfolgen, dass die Bewegungsenergie des Baumes nach Gl. (3.6) durch das dissipative Arbeitsvermögen der betroffenen Strukturen aufgenommen werden kann:

$$E_{B,eff} \leq E_{Feder} + E_{Struktur} \quad (3.7)$$

Einen wesentlichen Anteil hierbei bildet auch die Energiedissipation des Baumes beim Aufprallvorgang, insbesondere das Arbeitsvermögen der brechenden Äste der Krone, beschrieben durch die Feder  $R_B$ . Zur rechnerischen Behandlung sind Angaben zur Charakteristik der

Feder  $R_B$  erforderlich. Diese hängt in hohem Maße von der Beschaffenheit des Baumes bzw. der Kontaktstelle ab. Findet der Aufprall im Bereich der Krone statt, so ist die Feder relativ weich. Findet er dagegen im Bereich des Stammes statt, ist sie sehr hart. Für die praktische Anwendung ist es daher sinnvoll, zwei Belastungsszenarien zu unterscheiden (vgl. Bild 7):

- Fall A: Weicher Stoß, Aufprall erfolgt im Bereich der Krone
- Fall B: Harter Stoß, Aufprall erfolgt im Bereich des Stammes

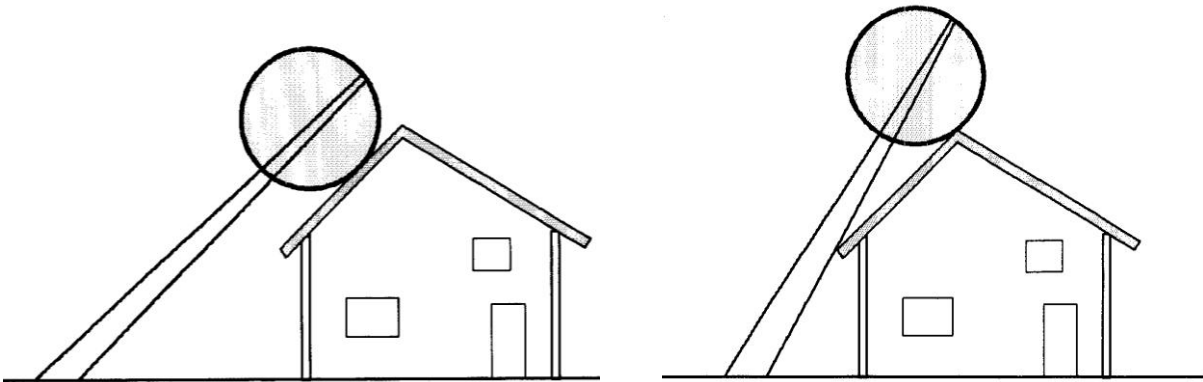


Bild 7: Fall A: Krone trifft Haus (weicher Stoß)

Fall B: Stamm trifft Haus (harter Stoß)

Für den Aufprall der Krone (Fall A) ist die Feder  $R_B$  dadurch gekennzeichnet, dass sie sich mit zunehmender Zusammendrückung versteift. Zu Beginn des Aufpralls sind nur die dünnen Äste am Rand der Krone beteiligt, später auch die stärkeren Äste im Inneren. Es wird eine progressive, parabelförmige Federkennlinie nach Bild 8 zugrunde gelegt.

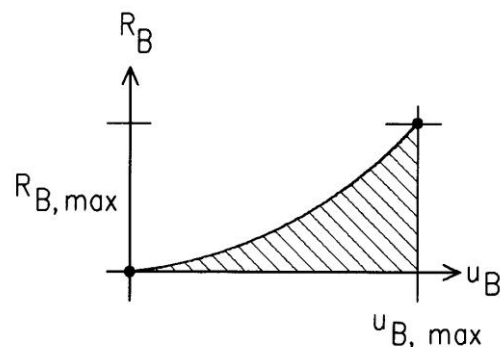


Bild 8: Federcharakteristik bei einem weichen Stoß

Die von der Feder aufnehmbare Energie bestimmt sich bei parabelförmiger Kennlinie aus

$$E_{Feder} = \frac{1}{3} R_{B,max} \cdot u_{B,max} \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow R_{B,max} = \frac{3E_{Feder}}{u_{B,max}} \quad (3.9)$$

Entsprechend dem hier betrachteten Fall A soll die gesamte kinetische Energie des Baumes von der Feder aufgenommen werden. Verformungen der Dachfläche sind bei diesem Vorgang vernachlässigbar. Das Gebäude muss dann für diejenige Kraft ausgelegt werden, die maximal für das Zusammendrücken der Feder benötigt wird, folglich für  $R_{B,max}$ .

Aus Beobachtungen an umgestürzten Bäumen werden für den maximalen Abbremsweg in Relation zum Kronendurchmesser folgende Werte vorgeschlagen:

$$u_{B,max} = d_K/3 \quad \text{für Winkel } \alpha > 45^\circ \quad (3.10a)$$

$$u_{B,max} = d_K/4 \quad \text{für Winkel } 30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \quad (3.10b)$$

$$u_{B,max} = d_K/5 \quad \text{für Winkel } \alpha < 30^\circ \quad (3.10c)$$

Für den Nachweis der beaufschlagten Bauteile können für diese „außergewöhnliche Einwirkung“ im Katastrophenfall die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite zu  $\gamma_F = 1,0$  in Ansatz gebracht werden. Nach Auffassung der Autoren ist eine Überlagerung mit Wind oder Schnee nicht erforderlich.

## 4 Untersuchungen mittels Finiter Elemente

Ziel der Autoren war, vereinfachte Berechnungsverfahren für die Praxis zu entwickeln. Zur Herleitung und Überprüfung dieser Verfahren wurden genauere Untersuchungen mit der Finite-Element-Methode durchgeführt. In nichtlinearen dynamischen Analysen für den Lastfall Baumwurf wurde neben einer nichtlinearen Kontaktfeder zur Beschreibung des Aufpralles auch die Massenverteilung des Stammes sowie dessen Biegeverhalten berücksichtigt. Die Masse der Krone wurde als Einzelmasse in der entsprechenden Höhe modelliert.

### 4.1 FE-Untersuchung zum Aufprall im Kronenbereich (Fall A)

Der zu betrachtende Baum möge von dem zu bemessenden Objekt solch einen Abstand haben, dass der Aufprall im Bereich der Krone erfolgt. Es wird unterstellt, dass die Bäume auf der dem Haus zugewandten Seite ausreichend Äste besitzen. Durch die relativ großen

Kronendurchmesser wird es in der Praxis wohl am Häufigsten vorkommen, dass die Dachfläche eines Hauses durch die Äste der Krone belastet wird. In diesem Fall wird der wesentliche Teil der kinetischen Energie  $E_B$  durch die großen Verformungen und das Brechen der Äste aufgezehrt, d.h. durch die Feder  $R_B$  selbst. Verformungen der Dachfläche sind bei diesem Vorgang vernachlässigbar.

Von zahlreichen durchgeführten Untersuchungen wird hier eine Berechnung zu einer 50-jährigen Buche entsprechend dem Beispiel in Kapitel 7 vorgestellt. Der 30 m hohe Baum wird durch 30 Beam-Elemente mit den Querschnittswerten des Stammes modelliert (vgl. Bild 9). Der Aufprall findet auf Höhenkote 22,5 m statt. Hier wird eine Kontaktfeder rechtwinklig zur Baumachse angeordnet mit einer parabelförmigen Federkennlinie entsprechend Bild 8. Die Kennwerte werden entsprechend Gl. 3.8 und 3.9 aus der kinetischen Energie des Baumes bei einem maximalen Federweg von 3,75 m angenommen (vgl. Beispiel Kapitel 7). Zugkräfte können nicht übertragen werden. Entlastung und Wiederbelastung erfolgt mit einer Steifigkeit von 690 kN/m, dies entspricht der 10-fachen Tangentensteifigkeit  $R_{B,max}/u_{B,max}$ . Als Anfangsbedingung wird eine Geschwindigkeit der Knoten des Baumstammes vorgegeben. Sie variiert von 0,0 m/s an der Wurzel und 17,1 m/s an der Baumspitze. In Bild 10 bis Bild 12 sind Ergebnisse der Berechnung auszugsweise dargestellt.

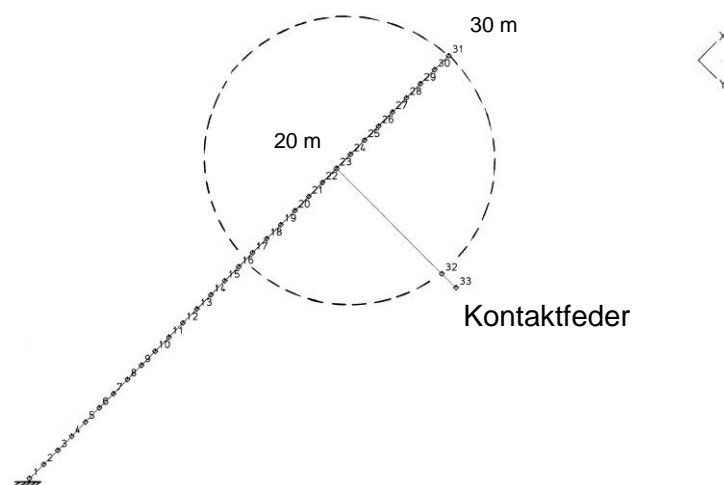


Bild 9: FE-Modell für Aufprall im Kronenbereich (weicher Stoß)



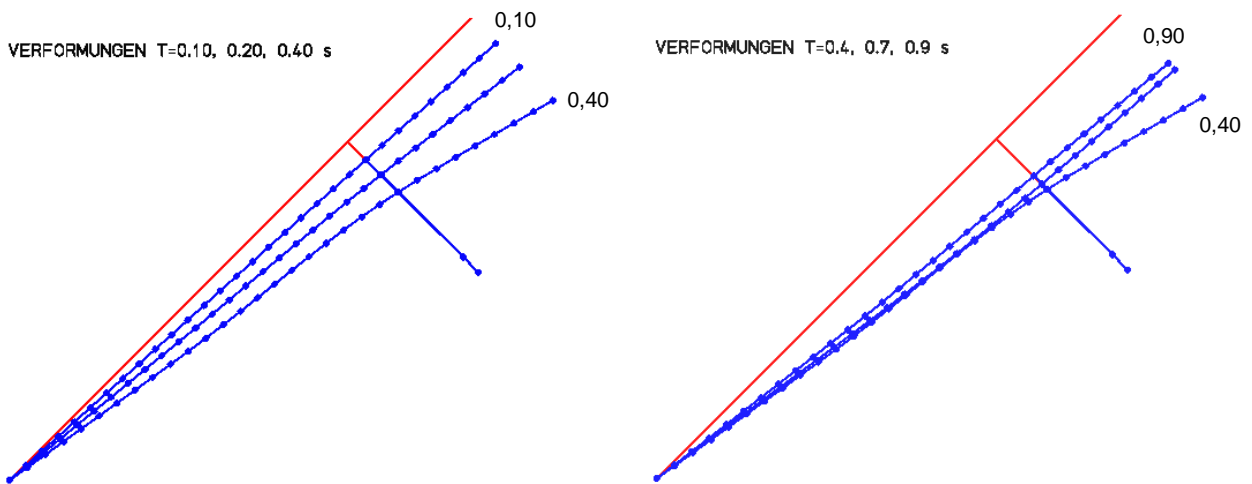


Bild 10: Verformungsbild des Stammes zu verschiedenen Zeitpunkten; im rechten Bild erkennt man das partielle Zurückschwingen des Stammes

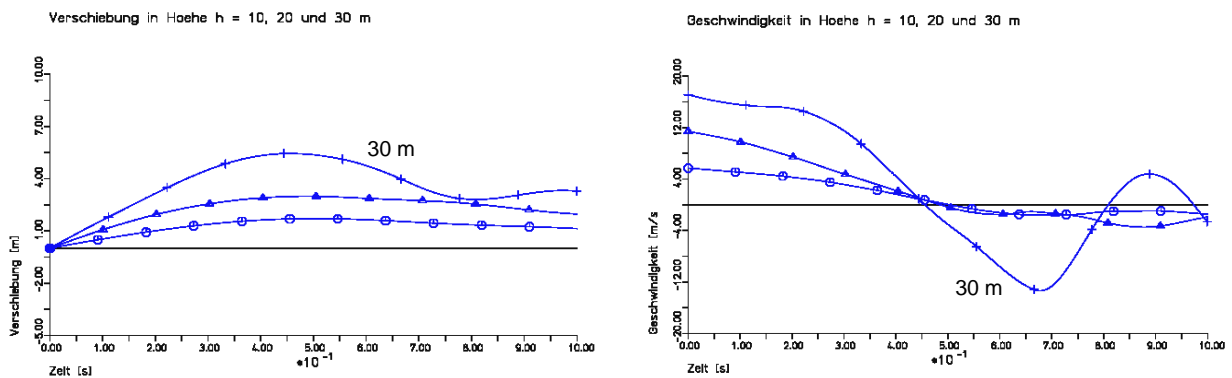


Bild 11: Zeitverlauf ausgewählter Verformungen und Geschwindigkeiten

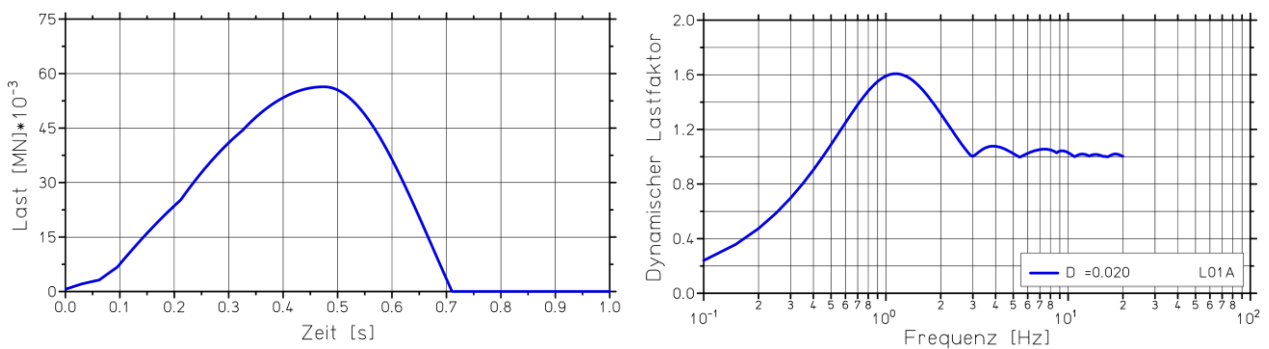


Bild 12: Zeitverlauf der Kontaktkraft in der Feder und zugehöriger dynamischer Lastfaktor ( $\beta_{\text{dyn}}$ ) im Frequenzbereich als Antwortspektrum

Die berechnete maximale Kontaktkraft beträgt 56 kN und ist damit etwas geringer als in der vereinfachten Berechnung in Beispiel Kapitel 7 (weicher Stoß) mit  $R_{B,\text{max}} = 68,7$  kN. Dies ist

dadurch begründet, dass die vereinfachte Berechnung von der konservativen Annahme einer starren Baumachse ausgeht. In Realität muss nicht die ganze kinetische Energie von der Kontaktfeder allein aufgenommen werden. Ein Teil ist im Baumstamm in Form von Biegeverformungen gespeichert.

Aus dem Zeitverlauf der Kontaktkraft wurde ein Antwortspektrum für 2% Dämpfung berechnet. Als maximaler dynamischer Lastfaktor wurde ein Wert von  $\beta_{\text{Dyn}} = 1,6$  bei einer Frequenz von ca. 1,2 Hz ermittelt. Dieser Wert ist zwar etwas größer als in Kapitel 5.1 pauschal mit  $\beta_{\text{Dyn}} = 1,5$  empfohlen. Unter Berücksichtigung der o.g. Reduktion der maximalen Kontaktkraft  $R_{\text{B,max}}$  erscheint jedoch die Empfehlung für die praktische Bemessung maßgebende Kombination gerechtfertigt.

#### 4.2 FE-Untersuchung zum Aufprall im Stammbereich (Fall B)

Zur Untersuchung des prinzipiellen Verhaltens bei einem Aufprall im Stammbereich wurde das in Kapitel 4.1 betrachtete Modell variiert. Bei sonst gleichen Bedingungen wurde die Kontaktfeder unterhalb der Krone angeordnet, d.h. auf Höhe 15 m. Es wird unterstellt, dass sich die Kontaktfeder nur wenige cm verformen kann infolge lokaler Eindrückungen bzw. Zerstörungen im Stamm oder am getroffenen Bauteil. Für die Berechnung wurde wieder ein parabelförmiger Verlauf mit Verfestigung angenommen entsprechend Bild 8. Ergebnisse dieser Berechnungen können hier nur beispielsweise wiedergegeben werden (vgl. Bild 13 bis Bild 16).

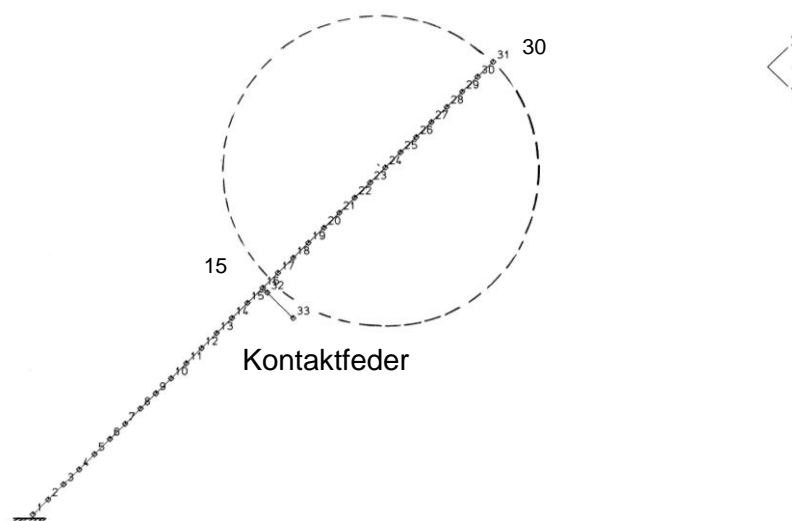


Bild 13: FE-Modell für Aufprall im Stammbereich (harter Stoß); die Kontaktfeder befindet sich unterhalb der Krone im Abstand von 15 m vom Fußpunkt

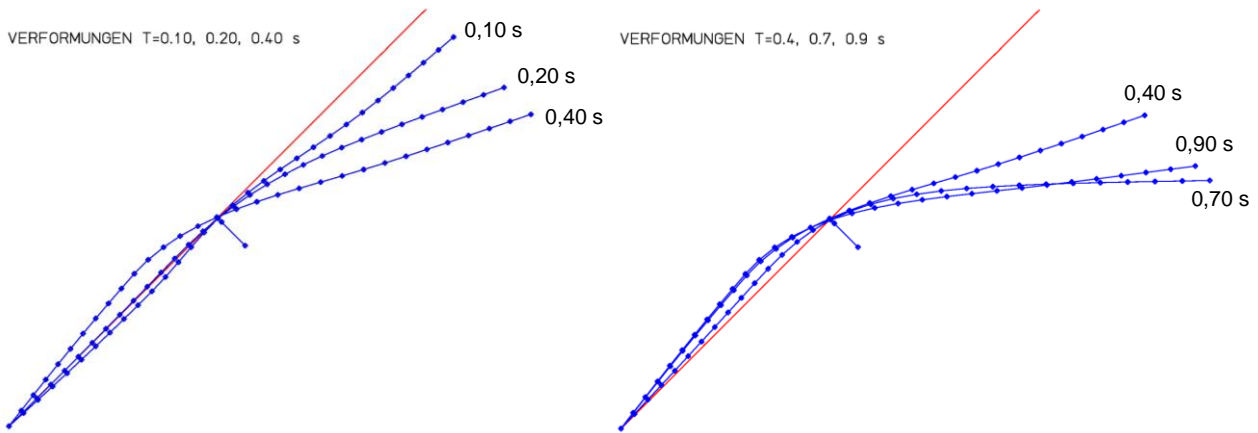


Bild 14: Verformungsbild des Stammes zu verschiedenen Zeitpunkten; in den Bildern erkennt man die relativ große Verformung der Baumspitze, das ausgeprägte Biegeverhalten und das partielle Zurückschwingen des Stammes nach 0,9 s

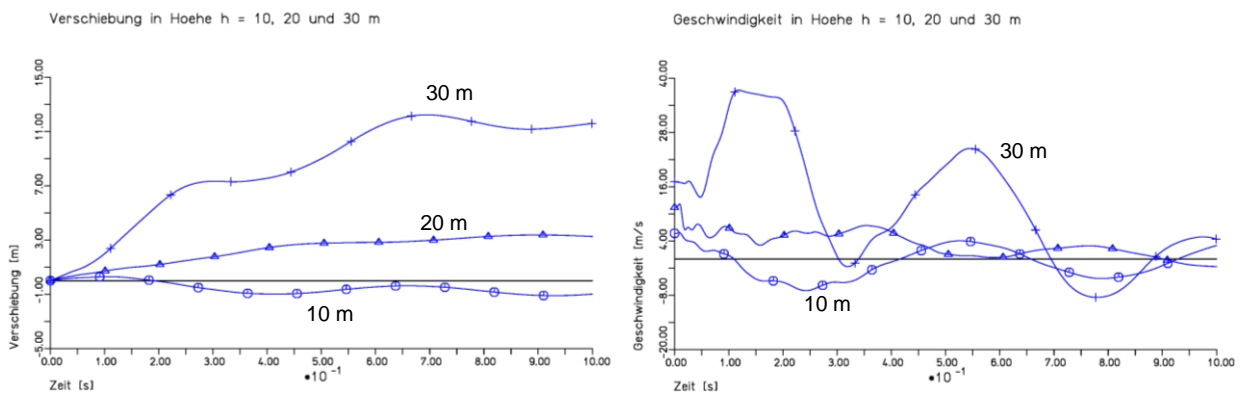


Bild 15: Zeitverlauf ausgewählter Verformungen und Geschwindigkeiten

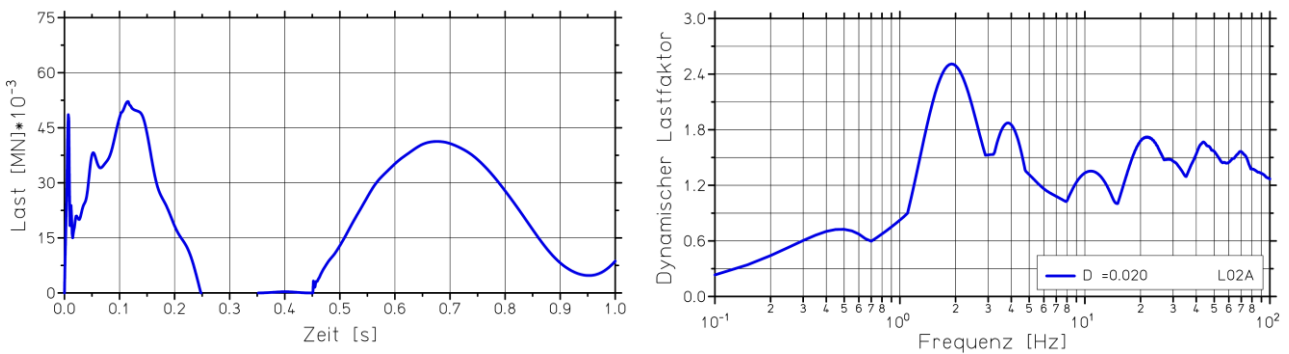


Bild 16: Zeitverlauf der Kontaktkraft und zugehöriger dynamischer Lastfaktor ( $\beta_{\text{Dyn}}$ ) im Frequenzbereich als Antwortspektrum; die maximale Last beträgt ca. 53 kN, der maximale dynamische Lastfaktor 2,5

Aus dem Zeitverlauf der Kontaktkraft wurde ein Antwortspektrum für 2% Dämpfung berechnet. Als maximaler dynamischer Lastfaktor wurde ein Wert von  $\beta_{\text{Dyn}} = 2,5$  bei einer Frequenz von ca. 2 Hz ermittelt. Damit beträgt die statische Ersatzlast für die Bemessung der beaufschlagten Baustrukturen maximal  $2,5 \cdot 53 = 132,5$  kN als Punktlast.

Aus der Erfahrung mit weiteren durchgeführten FE-Berechnungen zum Aufprall im Stammbereich kann für eine praktische Bemessung der betroffenen Baustrukturen die maximale statische Ersatzlast auf der sicheren Seite liegend wie folgt ermittelt werden:

- 1) Ermittlung der maximalen kinetischen Energie  $E_{B,\text{eff}}$  des Baumes beim Aufprall unter Berücksichtigung eines pauschalen Abminderungsfaktors von  $\eta_{B,\text{Diss}}$  (vgl. Abschnitt 5.1)
- 2) Ermittlung der maximalen Kraft  $R_{B,\text{max}}$  in der Kontaktfeder unter Annahme eines realistischen Federweges von  $u_{B,\text{max}} = 5$  cm für lokale Eindrückungen etc. (vgl. Gl. 3.8 bzw. Gl. 3.9)
- 3) Statische Ersatzlast  $S_{\text{stat,eff}} = 0,05 \cdot R_{B,\text{max}}$

Der dynamische Lastfaktor ist hier bereits bei der pauschalen Abminderung der Last berücksichtigt. Dieses vereinfachte Vorgehen kann alternativ zu dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Energiebilanzverfahren angewendet werden.

## 5 Vereinfachte Nachweisverfahren für den Lastfall „Baumwurf“

Wie in Kapitel 4 beschrieben, muss die Bewegungsenergie des Baumes nach Gl. (3.6) durch das dissipative Arbeitsvermögen der betroffenen Strukturen aufgenommen werden. Es muss also gelten:

$$E_{B,\text{eff}} \leq E_{\text{Feder}} + E_{\text{Struktur}} \quad (5.1)$$

### 5.1 Fall A: Aufprall Krone – statische Ersatzlast

Die Ausgangssituation ist in Kapitel 4.1 beschrieben. Bei solch einem „weichen Stoß“ kann man unabhängig vom Verhalten des gestoßenen Körpers eine transiente Belastungsfunktion angeben, und bei Berücksichtigung eines sog. Stoßfaktors auch eine statische Ersatzlast. Die von der Feder aufnehmbare Energie bestimmt sich bei parabelförmiger Kennlinie aus

$$E_{Feder} = \frac{1}{3} R_{B,max} \cdot u_{B,max} \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow R_{B,max} = \frac{3E_{Feder}}{u_{B,max}} \quad (5.3)$$

Entsprechend dem hier betrachteten Fall soll die gesamte kinetische Energie des Baumes von der Feder aufgenommen werden. Das Gebäude muss dann für diejenige Kraft ausgelegt werden, die maximal für das Zusammendrücken der Feder benötigt wird, folglich für  $R_{B,max}$ . Unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes der Aufpralllast wird der Stoßfaktor zur Berücksichtigung der dynamischen Effekte ausreichend genau angesetzt zu

$$\beta_{Dyn} = 1,5 \quad (5.4)$$

Damit ergibt sich für die statische Ersatzlast

$$S_{stat} = \beta_{Dyn} R_{B,max} = \frac{\beta_{Dyn} \cdot 3E_{Feder}}{u_{B,max}} = \frac{1,5 \cdot 3E_B}{u_{B,max}} \quad (5.5)$$

Diese Bemessungslast ist je nach Dachkonstruktion den Einzelbauteilen wie z.B. den Sparren und Pfetten zuzuweisen. Ggf. ist diese Last auf die beanspruchte Fläche  $A_A$  zu verteilen. Vereinfachend könnten hier angenommen werden:

- Kreisförmige Aufprallfläche entsprechend Bild 17 bzw. Ersatzquadrat
- Kugelförmige Lastverteilung nach Bild 18  
(eine kegel- bzw. pyramidenförmige Lastverteilung erscheint allenfalls beim harten Stoß angemessen).

Radius und Flächeninhalt der Auftrefffläche sowie statische Flächenlast bei kugelförmiger Verteilung berechnen sich aus

$$r_A = \sqrt{d_K u_{B,max} - u_{B,max}^2} \quad (5.6)$$
$$\Rightarrow A_A = r_A^2 \cdot \pi$$

$$p_{stat} = \frac{2S_{stat}}{A_A} \quad (5.7)$$

Alternativ zu diesem statischen Verfahren kann natürlich auch eine dynamische Analyse als Ein- oder Mehrmassensystem vorgenommen werden. Hierzu wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen, z.B. [3], [4].

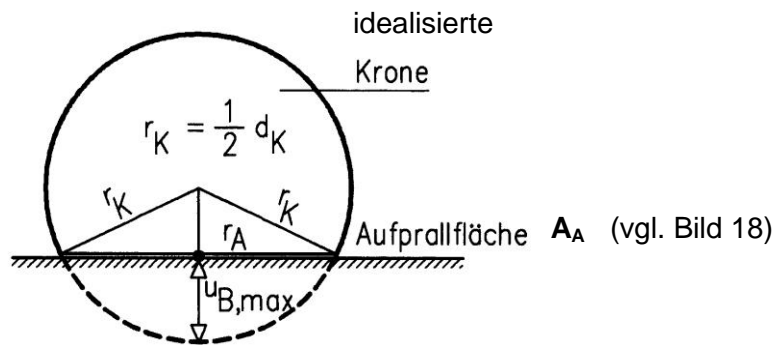


Bild 17: Aufprallfläche als Teil der kugelförmigen Krone

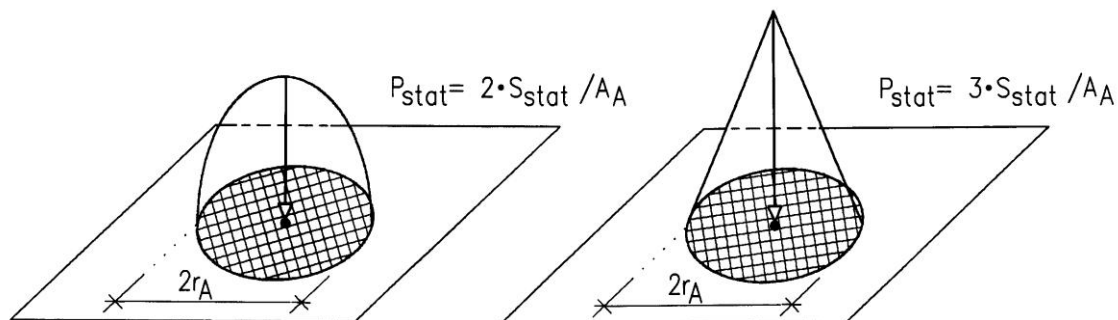


Bild 18: Kugel- und kegelförmige Lastverteilung über der Aufprallfläche

## 5.2 Fall B: Aufprall Stamm – Energiebilanz

Der zu betrachtende Baum soll von dem Objekt, das bemessen werden soll, solch einen Abstand haben, dass der Aufprall zuerst im Bereich des Stammes erfolgt. Bei den meisten in der Praxis vorkommenden Fälle wird zeitgleich oder anschließend auch der Bereich der Krone auf das Gebäude auftreffen und sich dadurch analog Kap. 5.1 am Lastabtrag beteiligen.

Geht man davon aus, dass der Stamm stabil genug ist und nicht bricht, muss die effektive kinetische Energie vom Baumstamm selbst bzw. von der Deformationsarbeit der Dachkonstruktion aufgezehrt werden. Bei Tragwerken in Stahl- und Stahlbetonbauweise geschieht

dies im Wesentlichen durch Plastifizierungen der Bauteile, im Holzbau durch die Nachgiebigkeit der Verbindungen.

In diesem als „harten Stoß“ zu bezeichnenden Lastfall ist die maximale Stoßkraft sowohl vom Deformationsverhalten des stoßenden und des gestoßenen Körpers abhängig. Es lässt sich keine vom getroffenen Bauteil unabhängige Last-Zeit-Funktion ermitteln. Im Gegensatz zum Aufprall im Bereich der Krone ist hier nur ein maximaler Abbremsweg von wenigen cm anzusetzen. Unter Beachtung der Gl. 3.8 und Gl. 3.9 für Energie und maximale Federkraft ergäbe sich demnach eine extrem hohe Federkraft  $R_{B,max}$  bzw. statische Ersatzkraft  $S_{stat}$ . Eine konventionelle Auslegung für diese Kraft ist mit den in der Praxis zur Ausführung kommenden Systemen kaum möglich, geschweige denn wirtschaftlich. Es empfiehlt sich, einen Nachweis in Form einer nichtlinearen dynamischen Analyse (vgl. Kapitel 4.2) oder vereinfachend in Form eines Energievergleiches durchzuführen.

Ausgehend von Gl. (5.1) muss nun die Struktur in der Lage sein, die effektive Energie des Baumes zu verzehren. Ähnlich wie bei der aus der Erdbebenauslegung bekannten „Kapazitätsbemessung“ müssen je nach Tragsystem und örtlichen Gegebenheiten Fließgelenke gebildet werden, die durch plastische Rotation in der Lage sind, die Energie aufzunehmen. Dies soll am einfachen Beispiel eines Einfeldträgers (Bild 19), der in Feldmitte getroffen wird, verdeutlicht werden. Für die maximal aufnehmbare plastische Formänderungsenergie  $E_{Pl}$  muss demnach gelten

$$E_{Pl} \geq E_{B,eff} \quad (5.8)$$

$$E_{Pl} = M_{Pl} \cdot \varphi_{Pl} \quad (5.9)$$

$$\varphi_{Pl} = \chi \cdot l_{Pl} \quad (5.10)$$

Hierin bedeuten  $\varphi_{Pl}$  den plastischen Rotationswinkel,  $\chi$  die Krümmung und  $l_{Pl}$  die Länge des plastischen Gelenkes.  $M_{Pl}$  bezeichnet das aufnehmbare plastische Moment.

Die aufnehmbare Energie lässt sich auch direkt aus einer berechneten oder gemessenen Kraft-Verformungsbeziehung ableiten (vgl. Bild 20). Sie ist abhängig von den verwendeten Baustoffen, dem vorhandenen Querschnitt und der konstruktiven Durchbildung. Hierzu wird auf die weiterführende Literatur verwiesen (z.B. [5]).

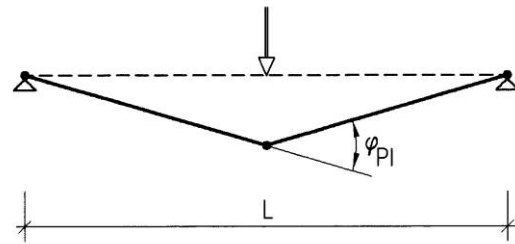


Bild 19: Einfeldträger der Länge  $L$  mit plastischem Gelenk

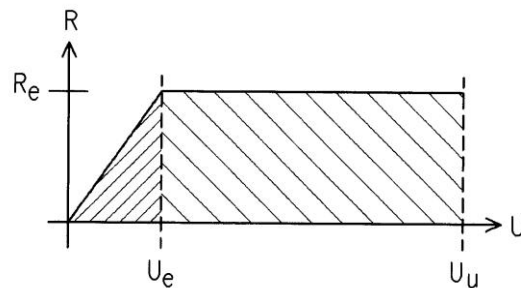


Bild 20: Elasto-plastische Kraft-Verformungsbeziehung, Formänderungsenergie als Flächen unter der Kurve

## 6 Konstruktive Durchbildung

Der konstruktiven Durchbildung der von einem Baumwurf betroffenen Bauteile kommt besondere Bedeutung zu. Es ist das Ziel, ein zähes und duktileres Tragwerk auszubilden, das möglichst viel Energie dissipieren kann. Bei Stahl- und Stahlbetontragwerken wird dies erreicht durch Ausbildung von Fließgelenken, bei Holzbauwerken insbesondere durch eine Nachgiebigkeit in den Verbindungen. Stabilitätsgefährdete Strukturen sollten nicht verwendet werden.

Für die konstruktive Durchbildung von Bauteilen aus Stahl und Stahlbeton sind im Hinblick auf die erforderliche Duktilität z.B. in der aktuellen Erdbebennorm EC8 zahlreiche Hinweise enthalten. Insbesondere ist darauf zu achten, dass die betroffenen Träger ihre Kräfte an die aussteifenden Bauteile weitergeben können, entweder durch Druckkontakt oder durch eine ausreichende Rückhängung. Die Auflager sind im Hinblick auf große Verformungen hinreichend tief zu wählen.



In der Holzkonstruktion des Dachstuhles sollten alle Stöße zug- und druckfest ausgeführt werden. Der Abstand der Sparren sollte möglichst 75 cm nicht überschreiten. Dachlatten sollten mindestens die Stärke 4/6 cm (Kanthölzer) besitzen. Werden für ein Dachgeschoss höhere Anforderungen gestellt als in den Schutzziele in Kapitel 1 beschrieben, so sind weitere Maßnahmen erforderlich. So kann neben einer verstärkten Ausführung des Dachstuhles das Durchschlagen der Dachhaut durch den Einbau dickerer, flächig angeordneter Holzwerkstoffe oder durch die Ausführung von Dachschrägen in Massivbauweise begegnet werden.

Allgemeine Angaben zur Aufnahme von elasto-plastischen Formänderungsenergien für den Holzbau lassen sich im Rahmen dieser Veröffentlichung kaum machen. Sie sind im Einzelfall unter Berücksichtigung des Gesamtsystems zu ermitteln. Es werden einige Gesichtspunkte genannt, die bei der Wahl eines Tragsystems in Holzbauweise beachtet werden sollten:

- Die plastische Verformungsfähigkeit bzw. Dämpfung vergrößert sich mit zunehmender Anzahl nachgiebiger Verbindungen.
- Bei Rahmentragwerken ist es sinnvoll, diese so zu dimensionieren, dass Plastifizierungen in den Riegeln und nicht in den Stielen auftreten (sog. Kapazitätsbemessung) sowie die Energie durch die Nachgiebigkeit biegesteifer Anschlüsse vernichtet wird.

Gerade mechanische Holzverbindungen sind durch die Fähigkeit gekennzeichnet, Energie durch plastische Verformungen zu dissipieren (vgl. [6]). Vorzeitiges Versagen durch Aufspalten des Holzes kann durch ausreichend große Abstände der Verbindungsmittel untereinander und vom Rand vermieden werden. Stiff förmige Verbindungsmittel mit niedriger Fließgrenze des Stahls sind wegen ihrer großen Verformungskapazität für zähe Verbindungen besser geeignet als Verbindungsmittel aus gehärtetem Stahl. Auch kann die Energiedissipation durch die Verwendung schlanker Stifte gesteigert werden. Außerdem wirkt die Verwendung schlanker Stifte ebenfalls der Spaltgefahr entgegen. Ein Tragfähigkeitsverlust kann zudem weitgehend verhindert werden, indem Stahlstifte verwendet werden, die einen hohen Auszieh Widerstand besitzen. Bei zimmermannsmäßigen Konstruktionen ist insbesondere auf eine gute Lagesicherung, z.B. von Versätzen, zu achten, als auch auf die konstruktive Anordnung von Zugsicherungen bei druckbeanspruchten Verbindungen.

Bild 21 zeigt eine alternative Möglichkeit der Aufnahme fallender Bäume durch eine Art Fangseil.



Bild 21: links: Rundholz unterhalb Dachrinne als "Fangseil" beim Schloss Roseck, Tübingen, rechts: Detailansicht Traufknoten (liegender Rahmen)

## 7 Beispiele – Fall A: Statische Ersatzlast (weicher Stoß)

Gegeben: Neues Gebäude am Rande eines Stadtparks; für eine derzeit ca. 50-jährige Buche in ca. 15 m Abstand von dem Gebäude ist nachzuweisen, dass die Baustrukturen durch einen möglichen Umsturz des Baumes nicht unzulässig beschädigt werden, insbesondere dass die Standsicherheit im Hinblick auf den Personenschutz gewährleistet ist;

Bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren für das neu zu erstellende Bauwerk ist daher eine 100-jährige Buche zugrunde zu legen. Nach [9] bzw. aus Tab. 1 ergibt sich für die Ertragsklasse 7 des Bodens:

$$\begin{aligned} h_0 &= 30 \text{ m} && \text{(Oberhöhe)} \\ d_{S,m} &= 31 \text{ cm} && \text{(Mitteldurchmesser Stamm)} \end{aligned}$$

Bestimmung der Aufprallgeometrie:

$$\begin{aligned} \alpha &= 40^\circ \\ h_B &= 22 \text{ m} \end{aligned}$$

Der Aufprall findet im Bereich der Krone statt. Hierbei handelt es sich um einen weichen Stoß, für den eine statische Ersatzlast nach Abs. 5.1 bestimmt werden kann.

Die Wahl des Faktors zur Berücksichtigung der Energiedissipation beim Bruch- und Aufprallvorgang (Fußpunkteinspannung) erfolgte zu (vgl. Abs. 3.1 bzw. [5]):

$$\eta_{A,Diss} = 0,6$$

Damit ergeben sich:

$$d_K = h_0/2 = 15 \text{ m}$$

$$\gamma_K = 0,008 \text{ kN/m}^3$$

$$m_K = 0,52 \cdot 15^3 \cdot 0,008 / 10 = 1,40 \text{ kNs}^2/\text{m}$$

$$h_K = (3/4) \cdot 30 = 22,50 \text{ m}$$

$$m_S = \frac{1}{4} \pi \cdot 0,31^2 \cdot \frac{8,0}{10} \cdot 30 = 1,81 \text{ kNs}^2/\text{m}$$

$$h_S = 30/3 = 10 \text{ m}$$

$$m_B = (1,81 \cdot 10,0^2 + 1,40 \cdot 22,5^2) / 22,0^2 = 1,84 \text{ kNs}^2/\text{m}$$

$$s(\alpha) = 30 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{40^\circ}{90^\circ} = 20,9 \text{ m}$$

$$v_o(s) = \sqrt{2 \cdot 7 \cdot 20,9} = 17,1 \text{ m/s}$$

$$v_B(s) = 17,1 \cdot 22,0 / 30,0 = 12,5 \text{ m/s}$$

$$E_B = \frac{1}{2} \cdot 1,84 \cdot 12,5^2 = 143 \text{ kNm}$$

$$E_{B,eff} = 0,6 \cdot 143 = 86,2 \text{ kNm}$$

$$u_{B,max} = 15/4 = 3,75 \text{ m}$$

$$R_{B,max} = 3 \cdot 86,2 / 3,75 = 68,7 \text{ kN}$$

$$S_{Stat} = 1,5 \cdot 68,7 = 103 \text{ kN}$$

$$r_A = \sqrt{15 \cdot 3,75 - 3,75^2} = 6,50 \text{ m}$$

$$A_A = 6,50^2 \cdot \pi = 133 \text{ m}^2$$

$$p_{stat} = 2 \cdot 103 / 133 = 1,55 \text{ kN/m}^2 \text{ bei } \gamma_F = 1,0$$

Für diese statische Last mit kugelförmiger Verteilung ist die Dachfläche, d.h. in erster Linie die Sparren und Pfetten, auszulegen. Je nach anzuwendender Norm ist hierbei zu berücksichtigen, dass der Teilsicherheitsbeiwert auf der Lastseite mit  $\gamma_F = 1,0$  angenommen werden kann. Es sei angemerkt, dass im vorliegenden Beispiel das Gesamtgewicht der Buche 32 kN beträgt. Unter Berücksichtigung der effektiven Masse wirken hiervon nur ca. 27% auf das Gebäude ein.

Die FE-Untersuchungen belegen, dass für den Aufprall im Kronenbereich das vereinfachte Rechenmodell auf der sicheren Seite liegend ein sehr gutes Näherungsverfahren darstellt. Ein Beispiel für den Fall des harten Stoßes (Aufprall Stamm) wird in [5] gegeben. Weitere Anregungen und Hinweise können bezogen werden bei den Autoren: Dr.-Ing. F.-H. Schlüter, **Prof. Eibl + Partner GbR, Ingenieure im Bauwesen**, Stephaniestr. 102, 76133 Karlsruhe, Tel. (0721) 91319-0, Fax: (0721) 91319-99 sowie Dipl.-Ing. M. Gerold, **Harrer Ingenieure GmbH**, Reinhold-Frank-Str. 48b, 76133 Karlsruhe, Tel. (0721) 1819-0, Fax: (0721) 1819-60.

### Literaturverzeichnis

- [1] MBO Musterbauordnung
- [2] BGmG Bautechnische Grundsätze für Grundschutzräume mittlerer Größe. (1986)
- [3] Biggs, J.M.:  
Introduction to Structural Dynamics. McGraw-Hill Book Company, New-York 1964
- [4] Eibl, J.; Henseleit, O.; Schlüter, F.-H.:  
Baudynamik. In: Betonkalender 1988, Teil II, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1988
- [5] Gerold, M.; Schlüter, F.-H.:  
Gebäude im Windwurfbereich von Bäumen.  
Veröffentlichung im Bauingenieur 2003 (in Vorbereitung)
- [6] Gerold, M.:  
Dynamisch beanspruchte Holzkonstruktionen – Schwingungsberechnungen und  
Konstruktionshinweise. In: Bautechnik 75, H. 8, S. 509 – 529, 1998
- [7] LfB:  
Ansatz zur Näherungsberechnung der Belastung eines Hauses (Dachfläche) durch  
umstürzenden Baum. Landesstelle für Bautechnik (ehem. Landesstelle für Baustatik,  
Tübingen), 1994, unveröffentlicht

- [8] Mattheck, C.; Bethge, K.:  
Das Fractometer - Ein Prüfgerät für Holz im Taschenformat. In: Allgemeine Forst  
Zeitschrift, H.3, 1993
- [9] MLR 1993:  
Hilfstabellen für die Forsteinrichtung. Ministerium für ländlichen Raum, Ernährung,  
Landwirtschaft und Forsten, Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (Hrsg.)
- [10] Schneider, B.:  
Anmerkungen zum Lastfall Baumsturz - Stoß auf Stabwerke.  
Hessische Landesprüfstelle für Baustatik, Darmstadt,  
In: Tagungsunterlagen zwölftes Fortbildungsseminar Tragwerksplanung, Vereinigung  
der Prüfindenieure für Baustatik in Hessen e.V.,  
Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau (Hrsg.), 1998
- [11] Wessolly, L.:  
Standicherheit von Bäumen. Stadt und Grün, H.4, S. 268 – 272, 1996