

03
2022

Konstruktiver Ingenieurbau

Stahlbau

Stabilisierung von
Kantprofilen unter
abhebenden Lasten mit
Sandwichelementen

Holzbau

Große Geste für den Sport

Trogbrücke mit Versprung

Baumlasten

Belastung von Stützbau-
werken durch Bäume

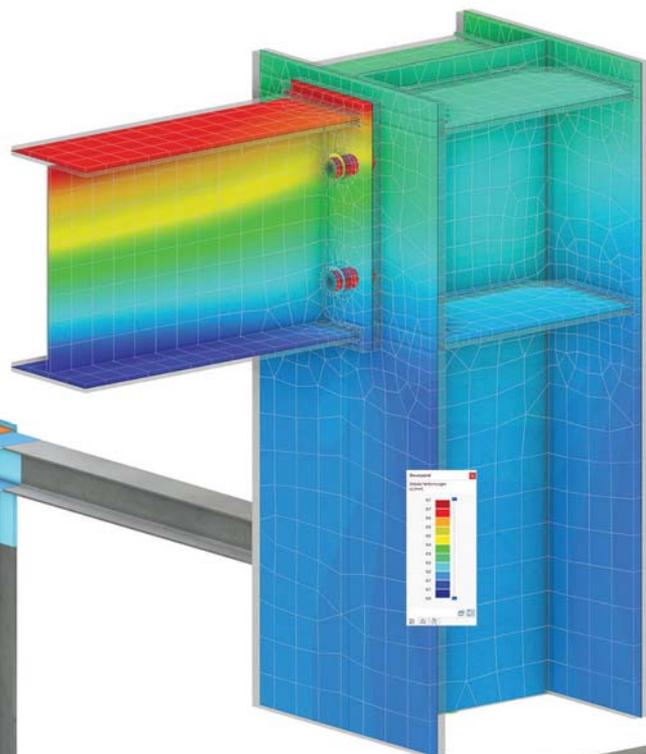
Recht

Lang lebe die
HOAI-Mindestsatzklage

Bauen in Gewässernähe

Aktuelles

Qualität der Planung
prägt Wirtschaftlichkeit
und Langlebigkeit eines
Bauwerks



Baumlasten

A white circular logo containing the letters 'KI' in a bold, sans-serif font. The background of the entire page is a photograph of a large, leafy tree with yellow flowers, situated next to a river and a path. A green metal fence runs along the riverbank in the foreground.

KI

Frank Prietz, Emilia Fiks, Andreas Detter

Belastung von Stützbauwerken durch Bäume

1 Anlass und Eingrenzung

Baugrubenverbauten und Uferneigungen sind übliche Ingenieurkonstruktionen mit gelegentlich nahestehendem Baumbestand. Während Einwirkungen aus dem Bodeneigengewicht dem Tragwerksplaner in der Regel keine Probleme bereiten, sind Hinweise zur Berücksichtigung von vertikalen und horizontalen Einwirkungen aus Bäumen in der Literatur und den Technischen Regeln nicht zu finden.

Die vorliegende Veröffentlichung macht einen ingenieurmäßigen und baupraktischen Vorschlag zur Ermittlung von Baumlasten, zu deren Einleitung in den Baugrund und zur Weiterleitung auf ein Stützbauwerk. Folgende Randbedingungen wurden dabei vereinfachend angenommen:

- Es werden nur Laubbäume betrachtet, die ein weitgehend ungestörtes Wurzelsystem ausbilden konnten. Nadelgehölze, stark eingeschränkte und insbesondere extrem flachgründige Standorte sind nicht Gegenstand der Betrachtungen.
- Es wird nur ein einzelner, freistehender Baum untersucht.
- Unmittelbare Einwirkungen aus der Wurzel bleiben unberücksichtigt (z.B. Durchwurzelung alter Steinmauern o.Ä.).
- Es liegt ein einheitlicher Sandboden vor (kein Grundwasser, keine Kohäsion) oder Böden, die diesem annähernd entsprechen.
- Der Baum weist keine Vorschädigung auf.

Baugruben als temporäre Konstruktionen müssen den vorhandenen Baumbestand berücksichtigen, die Baumlasten stellen eine Momentaufnahme dar.

Dagegen ist bei Uferwänden als Dauerbauwerke stets ein prognostiziertes Baumalter zu berücksichtigen. Insbesondere bei jüngeren Bäumen ist deren Wachstum und damit deren zukünftige Größe abzuschätzen.

2 Einwirkungen (Baumlasten)

2.1 Baumeigengewicht

Das Baumeigengewicht ermittelt sich aus dem Volumen und der Wichte des Baumes. Aufgrund der ungleichmäßigen Geometrie des Baumstammes und der von Baum zu Baum unterschiedlichen Verästelung und Belaubung wird bei der Ermittlung des Volumens die Formzahl f verwendet. Die Formzahl f liegt nach [1] bei 0,6 bis 0,8 und berücksichtigt die Verjüngung des Baumes mit der Höhe, die Blätter und die Feinäste. Je dichter die Belaubung der Baumkrone ist, desto größer sollte die Formzahl angenommen werden.

$$V_{Baum} = A_{Stamm} \cdot H_{Baum} \cdot f \quad \text{Gl. 1}$$

mit $f = 0,6 \text{ bis } 0,8$

Die Stammquerschnittsfläche A_{Stamm} ergibt sich aus dem gemessenen Stammdurchmesser des Baumes in einer Höhe von 1,00 m über Gelände:

$$A_{Stamm} = \pi \cdot \frac{D_{1,0m}^2}{4} \quad \text{Gl. 2}$$

Das Baumeigengewicht ergibt sich aus dem Baumvolumen multipliziert mit der Wichte des frischen Holzes (Grünholz):

$$G_{Baum} = V_{Baum} \cdot \gamma_{Grün} \quad \text{Gl. 3}$$

Zu beachten ist, dass die Grünholzwichte $\gamma_{Grün}$ größer als die Wichte eines getrockneten Konstruktionsholzes ist, welches üblicherweise im Bauwesen verwendet wird. In Tabelle 1 sind die Grünholzwichten für häufig vorkommende Baumarten zu finden. Aus den Werten für Trockenholz lässt sich das Frischgewicht für weitere Baumarten ableiten, indem mit einem Faktor von 1,5 (vgl. [2, 3])

- 1 Anlass und Eingrenzung
- 2 Einwirkungen (Baumlasten)
- 3 Zur Modellierung des Wurzelbereichs
- 4 Übertragung der Baumlasten auf die Stützbauwerke
- 5 Beispiel
- 6 Schluss und Ausblick

Baumlasten

bis 1,7 (unveröffentlichte eigene Daten) erweitert wird. Angesetzt werden nur die oberirdischen Teile des Baumes, da Wurzelholz üblicherweise deutlich leichter ist als Boden. Damit müssen die Baumwurzeln nicht über das Gewicht des Bodens hinaus berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Grünholzwichte nach Baumart [1]

Baumart	Wichte $\gamma_{\text{Grün}}$ [kN/m ³]
Berg-Ahorn	8,4
Birke	8,0
Buche	10,0
Eiche	10,0
Esche	8,8
Linde	8,4
Pappel	9,5
Platane	11,0
Roskastanie	8,0
Ulme	10,0

Sollte es sich bei dem zu bemessenden Stützbauwerk um ein Dauerbauwerk handeln, so ist das Baumwachstum für die Standzeit des Stützbauwerks zu berücksichtigen. Dazu kann bei jüngeren Bäumen nach [4] im Mittel ein Baumhöhenwachstum von ca. 0,4 m pro Jahr und nach [5] eine Durchmesservergrößerung des Stamms von 0,05 bis 0,08 m/a angenommen werden. Diese Zuwachsraten unterscheiden sich jedoch in Abhängigkeit von der Baumart sowie vom Zustand, Standort und Alter des Baumes erheblich. Gerade für ältere Bäume stagniert das Höhenwachstum meist und die Durchmesserzuwächse nehmen deutlich ab. Differenziertere Daten über die Entwicklung der Baumdimensionen (Allometrie) finden sich bei [6, 7]. Das Verhältnis zwischen Kronenbreite und Stammdurchmesser wurde z.B. bei [8] anhand mehrerer Baumarten beschrieben.

2.2 Windlasten

2.2.1 Windgeschwindigkeit und Böengeschwindigkeitsdruck

Die Luftströmung bzw. die Windgeschwindigkeit entsteht durch Temperatur- und Druckunterschiede in der Atmosphäre und wird durch die Reibung am Boden stark beeinflusst. Durch die Reibung wird der Luftströmung

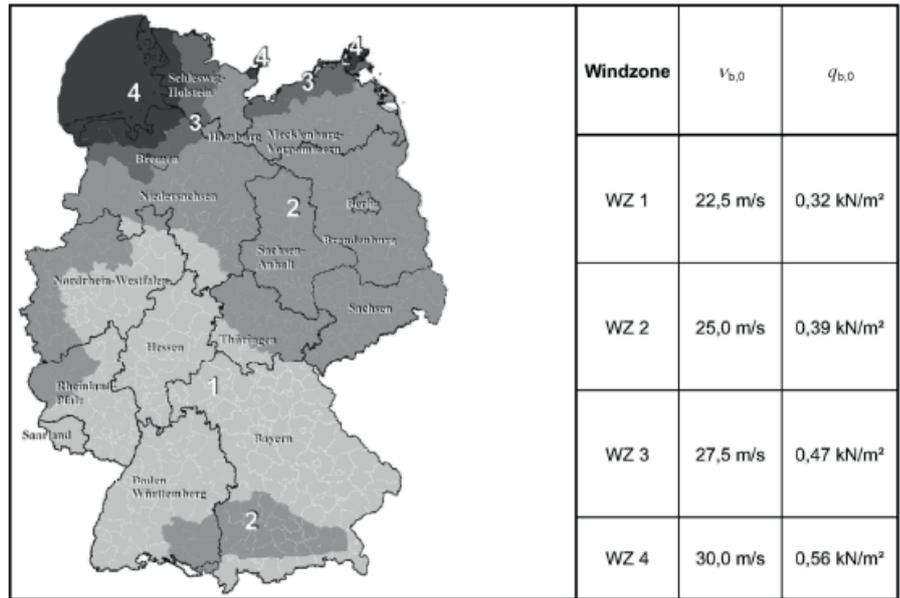


Bild 1: Grundwerte der Basisgeschwindigkeit und des Basisgeschwindigkeitsdrucks je nach Windzone [11]

Tabelle 2: Böengeschwindigkeitsdruck q_p in Abhängigkeit von der Geländekategorie [11]

Geländekategorie	I	II	III	IV
Mindesthöhe z_{min}	2,00 m	4,00 m	8,00 m	16,00 m
Mittlere Windgeschwindigkeit v_m für $z > z_{\text{min}}$	$1,18 \times v_b (z/10)^{0,12}$	$1,00 \times v_b (z/10)^{0,16}$	$0,77 \times v_b (z/10)^{0,22}$	$0,56 \times v_b (z/10)^{0,30}$
v_m / v_b für $z < z_{\text{min}}$	0,97	0,86	0,73	0,64
Turbulenzintensität I_v für $z > z_{\text{min}}$	$0,14 \times (z/10)^{-0,12}$	$0,19 \times (z/10)^{-0,16}$	$0,28 \times (z/10)^{-0,22}$	$0,43 \times (z/10)^{-0,30}$
I_v für $z < z_{\text{min}}$	0,17	0,22	0,29	0,37
Böengeschwindigkeitsdruck q_p für $z > z_{\text{min}}$	$2,6 \times q_b (z/10)^{0,19}$	$2,1 \times q_b (z/10)^{0,24}$	$1,6 \times q_b (z/10)^{0,31}$	$1,1 \times q_b (z/10)^{0,40}$
q_p / q_b für $z < z_{\text{min}}$	1,9	1,7	1,5	1,3
Böengeschwindigkeit v_p für $z > z_{\text{min}}$	$1,61 \times v_b (z/10)^{0,095}$	$1,45 \times v_b (z/10)^{0,120}$	$1,27 \times v_b (z/10)^{0,155}$	$1,05 \times v_b (z/10)^{0,200}$
v_p / v_b für $z < z_{\text{min}}$	1,38	1,30	1,23	1,15

Energie entzogen, sodass sich in Abhängigkeit von der Rauigkeit des Geländes eine über die Höhe veränderliche Windgeschwindigkeit einstellt. In bodennahen Schichten ist der Einfluss der Oberflächenrauigkeit am größten und die Windgeschwindigkeit am kleinsten. Mit steigender Höhe nimmt der Einfluss der Rauigkeit ab und die Windgeschwindigkeit steigt an. [9]

Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit bzw. des Geschwindigkeitsdrucks, dem Bäume ausgesetzt sind, kann DIN EN

1991-1-4 [10] (Windlasten) herangezogen werden. In Abhängigkeit von der Windzone, der Geländekategorie und der zu betrachtenden Höhe über Gelände können so

- die Basisgeschwindigkeit v_b ,
- der Basisgeschwindigkeitsdruck q_b ,
- die Böengeschwindigkeit v_p sowie
- der Böengeschwindigkeitsdruck q_p bestimmt werden.

Sowohl die Basisgeschwindigkeit v_b als auch der Basisgeschwindigkeitsdruck q_b sind von

Baumlasten

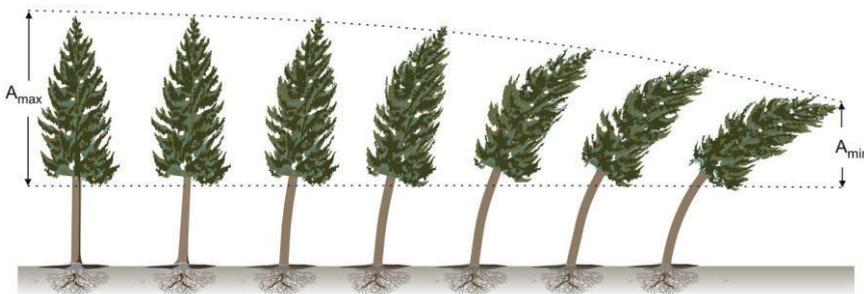


Bild 2: Verformungsverhalten eines Baumes bei Wind [12]

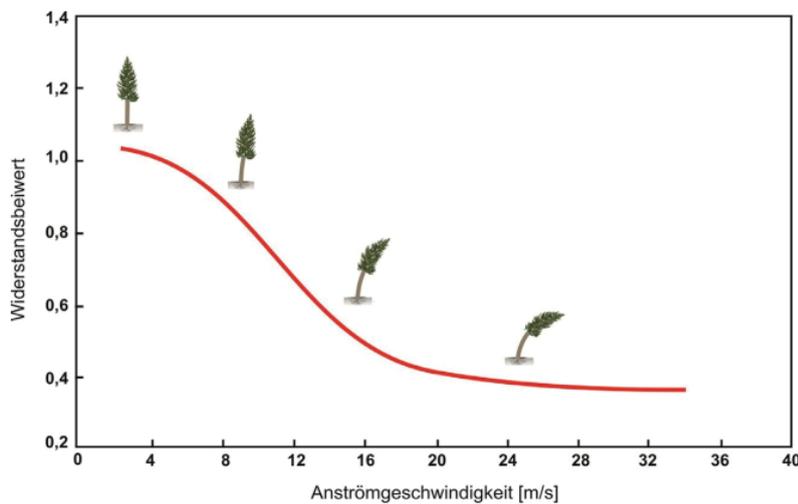


Bild 3: Veränderung des c_w -Wertes in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit [12]

deren Grundwerten $v_{b,0}$ und $q_{b,0}$ abhängig, die Bild 1 entnommen werden können. Weiterhin sind nach DIN EN 1991-1-4 [10] der Richtungsfaktor und der Jahresfaktor zu berücksichtigen. Nach dem deutschen Nationalen Anhang [11] betragen beiden Faktoren jedoch 1,0, sodass gilt:

$$\begin{aligned} v_b &= c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \\ &= 1,0 \cdot 1,0 \cdot v_{b,0} = v_{b,0} \end{aligned} \quad \text{Gl. 4}$$

$$\begin{aligned} q_b &= c_{dir} \cdot c_{season} \cdot q_{b,0} \\ &= 1,0 \cdot 1,0 \cdot q_{b,0} = q_{b,0} \end{aligned} \quad \text{Gl. 5}$$

Dabei ist

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad \text{Gl. 6}$$

mit ρ als Dichte der Luft (nach [11] $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$).

Für die Ermittlung der Windlast ist der Böengeschwindigkeitsdruck q_p in kN/m^2 von Relevanz. Ausgehend von $q_{b,r}$ der Geländekategorie und der zu betrachtenden Höhe z kann der Böengeschwindigkeitsdruck q_p nach Tabelle 2 ermittelt werden.

2.2.2 Luftwiderstand des Baumes

Bei Stürmen lässt sich die Nachgiebigkeit von Bäumen sehr gut beobachten: Der Baumstamm samt Baumkrone verformt sich und die Zweige und Blätter legen sich in den Wind. Durch diese Verformung wird die Anströmungsfläche des Baumes verringert und es stellt sich eine aerodynamisch günstigere Form ein (siehe Bild 2). Diese Formmodifizierung kann durch den Luftwiderstandsbeiwert c_w beschrieben werden und ist als der Strömungswiderstand eines umströmten Körpers definiert. [1]

Der Luftwiderstandsbeiwert c_w ist bei Bäumen ein veränderlicher Wert, der von der Windgeschwindigkeit abhängig ist. Bei sehr

schwachen Winden ist die Formänderung der Baumkrone minimal, sodass der c_w -Wert dann bei ca. 1,0 liegt. Mit steigender Windgeschwindigkeit nimmt der Baum eine immer günstigere Form an, sodass der c_w -Wert absinkt. Nach [1] kann ab der Windstärke neun nach Beaufort, was einer Windgeschwindigkeit von 20,8 – 24,4 m/s entspricht [13], von einem Minimum des c_w -Wertes ausgegangen werden (siehe Bild 3).

Nach dem „Stuttgarter Festigkeitskatalog“ [1] können je nach Baumart die in Tabelle 3 dargestellten c_w -Werte für die Bestimmung von Windlasten angesetzt werden.

Tabelle 3: c_w -Werte nach [13]

Baumart	c_w -Wert [-]
Ahorn	0,25
Birke	0,12
Buche	0,25 - 0,30
Eiche	0,25
Esche	0,20
Linde	0,25 - 0,30
Pappel	0,20 - 0,30
Platane	0,25
Roskastanie	0,35
Ulme	0,25

2.2.3 Windangriffsfläche

Die Größe der Windlastresultierenden ist im Wesentlichen von der Größe der Windangriffsfläche abhängig. Zur genaueren Abschätzung der Kronenfläche und Kronenform kann eine Abbildung der Baumsilhouette auf einem Foto verwendet werden (siehe Bild 4).

Steht kein genauere Umriss des Baumes zur Verfügung, so lässt sich die Form der Kronenfläche ausreichend genau durch einen Kreis oder eine Ellipse idealisieren und mit

$$A_{Krone} = r^2 \cdot \pi \quad \text{Gl. 7}$$

oder

$$A_{Krone} = a \cdot b \cdot \pi \quad \text{Gl. 8}$$

berechnet werden (siehe Bild 5).

Baumlasten

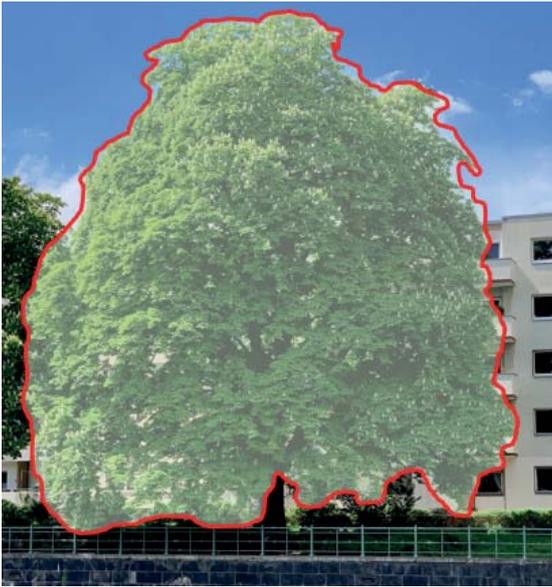


Bild 4: Umrise der Baumkrone an einem Beispielbaum

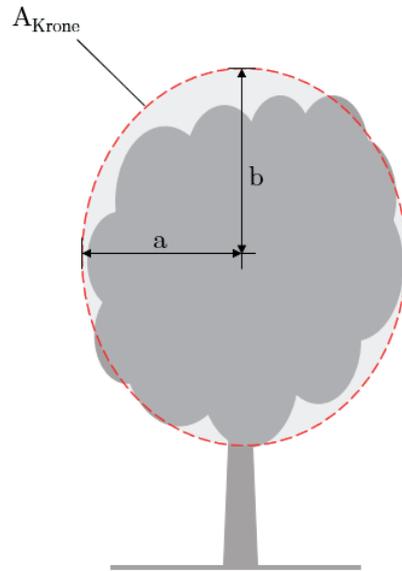


Bild 5: Als Ellipse idealisierte Baumkrone

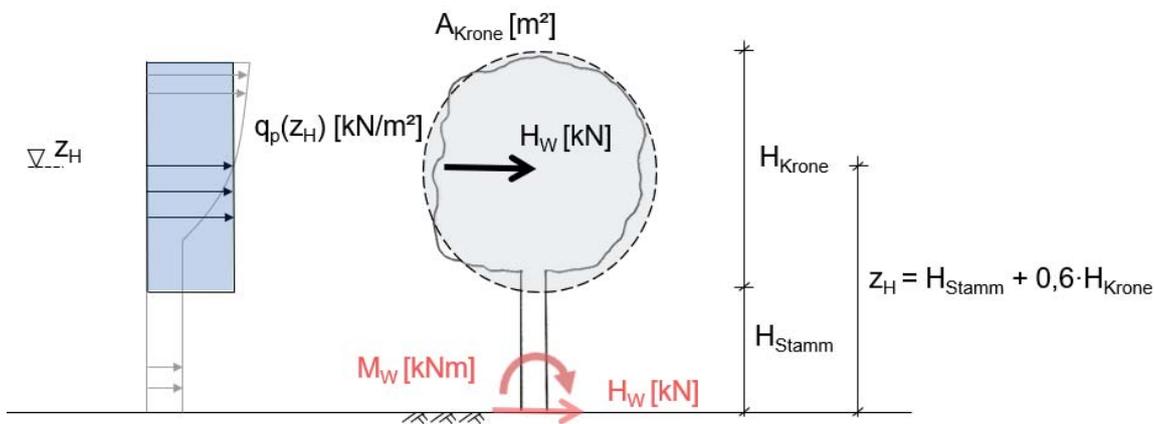


Bild 6: Darstellung der Windlasten auf einen Baum und der Schnittgrößen am Stammfuß

Wie auch bei der Ermittlung des Baumgewichts ist bei der Bestimmung der Windangriffsfläche die Vergrößerung der Baumkrone bei Dauerbauwerken zu berücksichtigen.

2.2.4 Windlastresultierende und Biegemoment am Stammfuß

Die auf einen Baum einwirkende Windlastresultierende H_W kann nun mit den in Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.3 aufgeführten Informationen ermittelt werden:

$$H_W = q_p(z_H) \cdot A_{Krone} \cdot c_w \quad \text{Gl. 9}$$

$q_p(z_H)$ Böengeschwindigkeitsdruck in Höhe z_H nach Tabelle 2
 z_H Angriffshöhe der Windlastresultierenden
 $H_W (z_H = H_{Stamm} + 0,6 \cdot H_{Krone})$

A_{Krone} projizierte Kronenfläche
 c_w Luftwiderstandsbeiwert des Baumes

Der Faktor 0,6 resultiert aus Nebenrechnungen, da die Verteilung des Windes über die Höhe idealisiert als konstant angenommen wird.

Das zugehörige Biegemoment am Stammfuß ergibt sich unter Vernachlässigung der Windlast des Stammanteils zu:

$$M_W = H_W \cdot z_H \quad \text{Gl. 10}$$

2.2.5 Baumspezifische Anpassungen und weiterführende Analysen

Dieses Verfahren greift dann zu kurz, wenn die Krone über die Höhe nicht symmetrisch ist wie im vorliegenden Beispiel, sondern beispielsweise einem spitzen Kegel oder

einer Pilzform ähnelt. In diesem Fall spielt die höhenabhängige Windgeschwindigkeit eine große Rolle, weil die Flächenanteile der Krone stark über die Höhe variieren [6]. Auch wird bei diesem einfachen Verfahren die dynamische Überhöhung der Windlast ausgeblendet, die nach Eurocode 1 für schwingungswillige Strukturen im Strukturbeiwert c_s berücksichtigt werden muss. In aktuellen Untersuchungen konnten Resonanzeffekte bei Bäumen im natürlichen Wind aber nicht nachgewiesen werden [7]. Auch nach anderen Erfahrungen ist ein Aufschwingen im Wind nur bei waldartigen Bäumen möglich, bei typischen Stadt- und Straßenbäumen aber eher auszuschließen.

Die vorgeschlagene Windlastschätzung sollte daher als ein einfacher Ansatz verstanden werden. Für eine genauere Ermittlung der

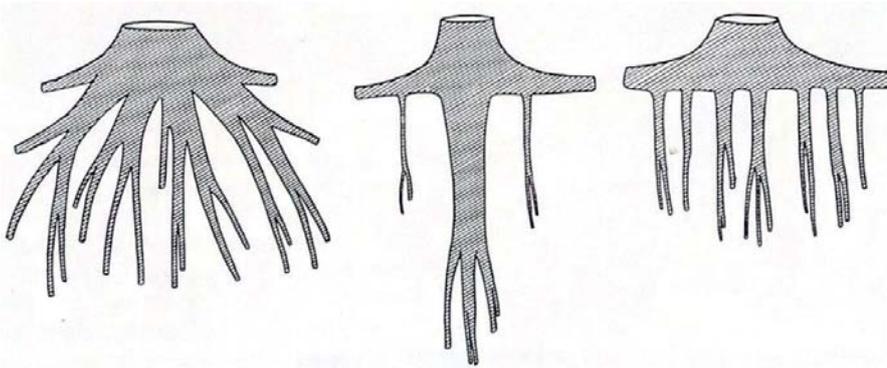


Bild 7: Wurzelsysteme: Herzwurzler, Pfahlwurzler und Senkerwurzler (von links nach rechts) [15]

Windlast stehen spezielle Software-Programme der Baumstatik zur Verfügung (z.B. TreeCalc, www.treecalc.com oder Arbostat, Hersteller arbosafe GmbH), mit denen die vorhandene Kronenform und auch die Dynamik der Bäume im Wind berücksichtigt werden kann.

2.2.6 Übertragung der Windlasten in den Wurzelbereich

Nach der Ermittlung des einwirkenden Biegemoments M_w muss überprüft werden, ob dieses durch den Widerstand des Baumstammes $M_{Rd,St}$ aufgenommen werden kann. Das Stammversagen infolge Biegebruch erfolgt in zwei Schritten. Zu Beginn äußert sich das Primärversagen des Stammes. Dabei werden die Fasern auf der Biegedruckseite gestaucht und es bilden sich die ersten irreversiblen Schäden durch Rissbildung in der Faserstruktur. Bei fortschreitender Belastung wird die Druckseite noch weiter gestaucht, während die Spannungen auf der Biegezugseite sukzessive ansteigen. Sobald hier die aufnehmbare Zugspannung der Holzfasern überschritten wird, setzt das Sekundärversagen ein und es kommt zur Bildung von Quer- und Längsrissen, die von der Außenseite des Stammes nach innen voranschreiten. Damit tritt der endgültige Biegebruch ein. Die Festigkeiten des jeweiligen Grünholzes können internationalen Katalogen entnommen werden. Für das Primärversagen kann danach eine aufnehmbare Druckfestigkeit von ca. 14–28 MPa (siehe Tabelle 4) angesetzt werden. Aufgrund des zweistufigen Versagensverlaufs im grünen Holz übersteigt die endgültige Biegefestigkeit (MOR = modulus of rupture) die Druckfestigkeit im Mittel um etwa 80 % (vgl. [24]).

Tabelle 4: Druckfestigkeit f_k längs zur Faser (Primärversagen) nach [1]

Baumart	f_k [MN/m ²]
Ahorn (Bergahorn)	25,0
Birke	22,0
Buche (Rotbuche)	22,5
Eiche (Stieleiche)	28,0
Esche	26,0
Linde (Winterlinde)	20,0
Pappel (Schwarze Pappel)	20,0
Platane	27,0
Roskastanie	14,0
Ulme	20,0

Für die hier vorgenommene Betrachtung ist das aufnehmbare Biegemoment des Stammes für den Biegebruch (Sekundärversagen) maßgebend und lässt sich wie folgt ermitteln.

$$M_{Rd,St,I} = f_k \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{32} = f_k \cdot W_{St} \text{ (Primärversagen)} \quad \text{Gl. 11}$$

$$M_{Rd,St,II} = 1,8 \cdot M_{Rd,St,I} \text{ (Sekundärversagen)} \quad \text{Gl. 12}$$

Hinweis: Der Spannungsanteil aus der Normalkraft (hier: Baumeigengewicht) wird aufgrund der Geringfügigkeit nicht berücksichtigt.

Nach der Ermittlung der zwei Größen: einwirkendes Windmoment M_w und aufnehmbares

Biegemoment durch den Stammwiderstand $M_{Rd,St}$ ist davon der Kleinstwert für die weitere Berechnung zu berücksichtigen.

3 Zur Modellierung des Wurzelbereichs

3.1 Die Wurzelsysteme

In der Morphologie werden bei Bäumen hauptsächlich drei verschiedene Wurzelsysteme unterschieden:

- a. Herzwurzelsystem
- a. Pfahlwurzelsystem
- b. Senkerwurzelsystem

Das Herzwurzelsystem bildet einen halbkugelähnlichen Wurzelballen mit schräg verlaufenden, kräftigen Wurzeln aus. Das Kennzeichen des Pfahlwurzelsystems ist die aus dem Stamm vertikal ausgehende, stark ausgeprägte Primärwurzel. Das Wurzelbild eines Senkerwurzelsystems ist geprägt durch starke Hauptseitenwurzeln, die parallel zur Geländeoberfläche verlaufen. [16]

Umweltverhältnisse haben einen großen Einfluss auf das Wachstum, sodass verschiedene Bäume derselben Art eine andere Wurzelentwicklung aufweisen. Es bildet sich oft ein an die Umgebung angepasstes Wurzelsystem aus, das eine Mischung, zum Beispiel aus dem Herz- und Senkerwurzelsystem, darstellt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass sich ein Wurzelsystem im Laufe des Baumalters modifiziert und die Gestalt eines anderen Wurzelsystems annimmt. [16]

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, umfasst die hier vorliegende Untersuchung nur Laubbäume mit Herzwurzelsystemen an weitgehend ungestörten Standorten. Dazu zählen z.B. die Baumgattungen Ahorn, Buche, Kastanie, Linde oder Platane. Deren Baumarten sind oft in städtischen Gebieten vorzufinden. Wenn sie ohne erhebliche Einschränkungen des stammnahen Wurzelbereichs in städtischen Freiflächen stehen, sind die in diesem Artikel dargelegten Berechnungsansätze für die meisten Stadtbäume nutzbar.

3.2 Das Kippen eines Baumes durch Versagen der Wurzelverankerung

Das Versagen der Wurzelverankerung kann als ein mehrstufiger Prozess beschrieben werden. Bis zum endgültigen Versagen beteiligen sich in unterschiedlichen Phasen unterschiedliche Verankerungselemente. [17]

Baumlasten

Im stammnahen Bereich ist ein sehr steifes und verholztes Wurzelsystem vorhanden. Diese Wurzeln weisen große Durchmesser auf und können daher einen großen Widerstand gegen Verformungen leisten [10]. Wird der Baum durch eine horizontale Last beansprucht, wird auf der windabgewandten Seite durch das steife Wurzelsystem eine Druckspannung in den Boden eingeleitet. Aufgrund seiner Druckbelastbarkeit und der Steifigkeit des Wurzelsystems hindert der Boden den Baum daran, auf der windabgewandten Seite in den Boden einzusinken. Wird die Kraft erhöht, treten auf der windzugewandten Seite erste Bodenhebungen auf. Diese schreiten immer weiter fort, je mehr die Wurzeln auf der windabgewandten Seite unmittelbar neben dem Stamm abknicken. Durch das Aktivieren der Zugwurzeln wirkt deren Verankerung auf der windzugewandten Seite dann ebenfalls der eingeleiteten horizontalen Zugkraft entgegen. [17]

Eine gute Darstellung der Bodenbewegung liefert Coutts in [19] und [20].

Damit die Neigung des Baumes sich weiter erhöht und der Kippvorgang fortschreitet, muss die Windeinwirkung zu einem bestimmten Zeitpunkt im Versagensverlauf alle Wurzeln im stammnahen Wurzelbereich auf der windabgewandten Seite vollständig abknicken und brechen. Nach ingenieurmäßigem Verständnis muss der Querschnitt der hier vorhandenen Wurzeln dazu einer nicht mehr tragbaren Biegebeanspruchung ausgesetzt sein. [17]

Nachdem der stammnahe Wurzelquerschnitt versagt hat, erhöhen sich die Verformungen und Belastungen in den Zugwurzeln auf der windzugewandten Seite. Sie bestimmen nun die Resttragfähigkeit des Systems. Zu diesem Zeitpunkt ist die maximale Widerstandskraft der Verankerung des Baumes im Boden aber meist längst überschritten. Wenn die nun wirksamen Zugkräfte in den Wurzeln deren Widerstandsfähigkeit überschreiten, erfolgt ein sukzessives Reißen der Wurzel und Kippen des Baumes. Während des Kippens rotiert das System um einen unterhalb des Stammes liegenden Punkt, wobei die zuvor druckbelasteten, inzwischen abgeknickten Wurzeln auf der windabgewandten Seite nun sogar eine gewisse Zugbeanspruchung erfahren können. [17]

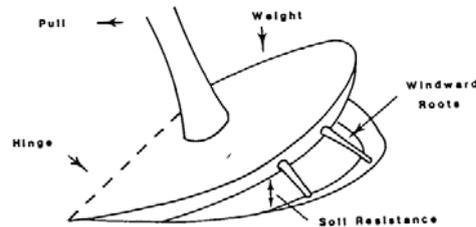


Bild 8: Darstellung der Bewegung der Wurzelplatte eines kippenden Baumes nach [20] und Foto eines entwurzelten Baumes nach dem Orkan „Zeynep“ vom 19. Februar 2022

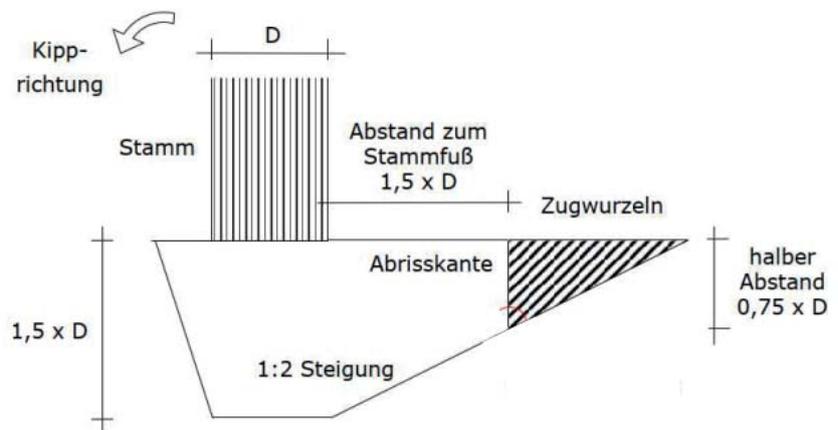


Bild 9: Geometrie des Wurzelmodells nach [21]

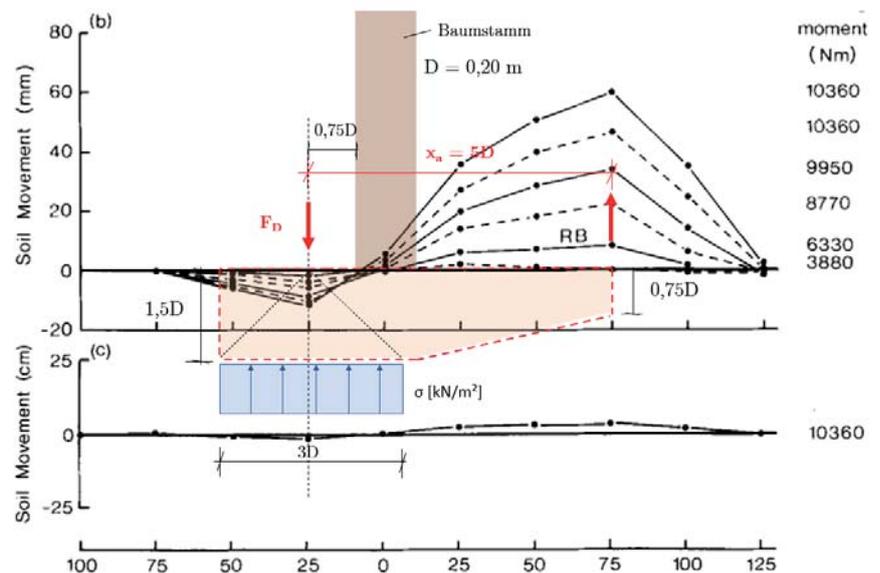


Bild 10: Verformungsmessung der Wurzelplattenbewegung für verschiedene Laststufen nach [19] und das daraus hergeleitete Wurzelmodell

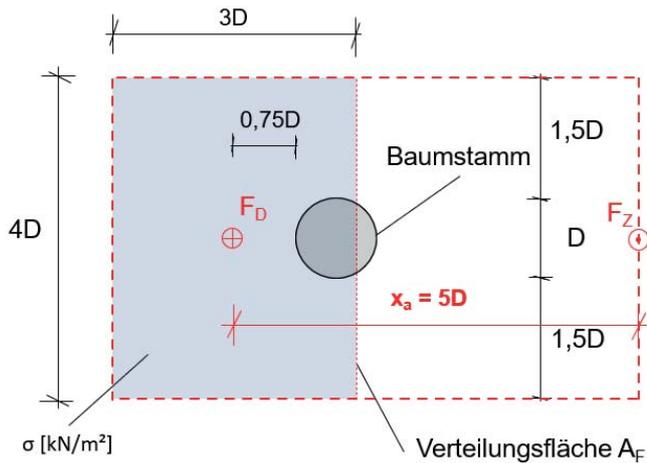


Bild 11: Wurzelmodell in der Draufsicht

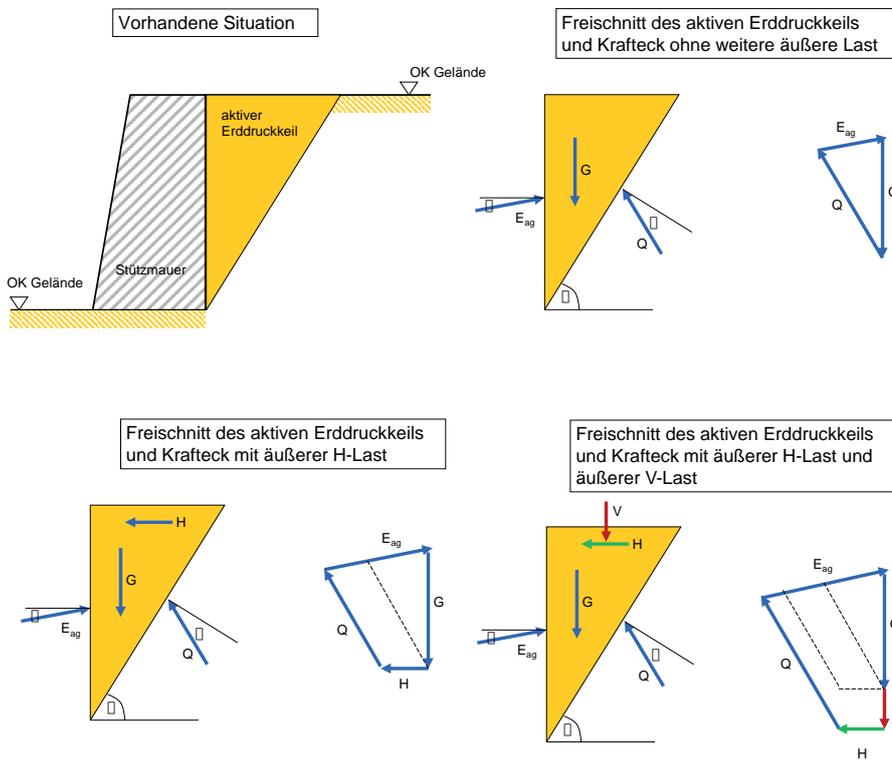


Bild 12: Qualitative Erhöhung des aktiven Erddrucks infolge äußerer Lasten innerhalb des aktiven Erdkeils

3.3 Modellfindung

Ein Modell der Einleitung des Windmomentes und der zugehörigen Horizontallast in den Baugrund zu finden, ist der zentrale Punkt der vorliegenden Untersuchung. Dazu wurden insgesamt vier verschiedene Wurzelmodelle betrachtet, die das Tragverhalten eines standsicheren Baumes bei einer Windbeanspruchung abbilden könnten.

Die Grundlage für die Modellfindung bildet ein Wurzelmodell von Detter, welches in [21] Anwendung findet (siehe Bild 9). Die Abmessungen des Wurzelballens werden dabei in Abhängigkeit vom Stammdurchmesser D in einem Meter Höhe über Gelände festgelegt.

Beispielberechnungen ergaben, dass sowohl auf der windzugewandten als auch auf der windabgewandten Seite die Baumwurzeln einer Zugbeanspruchung ausgesetzt werden. Dieses Verhalten beschreibt den Kippvorgang und wird in [17] ebenfalls beschrieben (siehe Kapitel 3.2).

Vor dem Kippvorgang wird das Windmoment M_W durch ein vertikales Kräftepaar aufgenommen. Die Grundlage dafür bietet eine Verformungsmessung eines kippenden Baumes in [19], wonach das endgültige Modell festgelegt wird (siehe Bild 10).

Die Lage der Kräfte F_D und F_Z wird an den Stellen der größten Verformung festgelegt. Daraus ergibt sich in Abhängigkeit vom Stammdurchmesser ein Hebelarm $x_a = 5 \cdot D$. Die Ermittlung der Verteilungsfläche der Biegedruckspannung erfolgt unter der Annahme, dass sich die Kraft F_D unter einem Winkel von 45° bis in die Tiefe von $1,5 \cdot D$ verteilt und sich so eine Fläche von $A_F = 3D \cdot 4D$ herleiten lässt.

$$F_Z = F_D = \frac{M_W}{5 \cdot D} \quad \text{Gl. 13}$$

Das Eigengewicht des Baumes wird vereinfachend zur Bodenspannung infolge F_D addiert, sodass sich eine Bodenpressung von

$$\sigma_{G+F_D} = \frac{G + F_D}{12 \cdot D^2} \quad \text{Gl. 14}$$

ergibt.

Zur Vereinfachung der weiteren Berechnung wird auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass die Zugkraft F_Z außerhalb des aktiven Erddruckkeils angreift.

4 Übertragung der Baumlasten auf die Stützbauwerke

Aus Bild 12 wird deutlich, wie die zusätzlichen Baumlasten (H- und V-Last) das Gleichgewicht eines aktiven Erddruckkeil qualitativ verändern: der aktive Erddruck E_{ag} wird größer.

Die Vertikallast aus dem Baum ist eine örtlich begrenzte Flächenlast und beinhaltet das abgeschätzte Eigengewicht des Baumes sowie die verteilte Biegedruckkraft aus dem Windmoment. Sie greift in der Tiefe $t = 1,5D$ an und ist konstant auf einer Fläche $3D \cdot 4D = 12D^2$ verteilt. Die Horizontallast entspricht der Windlast und greift in einer Tiefe von $t = 0,75D$ an, konstant verteilt auf einer Breite von $4D$. Der Abstand beider Lasten von der Hinterkante Stützwand beträgt a_p .

Beide Lasten sind örtlich begrenzt und müssen für die Berechnung mit einem EDV-Programm am 1-m-Streifen in unbegrenzte Strecken- bzw. Flächenlasten umgewandelt werden.

Für die vertikale Flächenlast $p = p_G + p_M$ (siehe Bild 14) gilt:

$$p' = p \cdot \frac{4D}{l_p} \quad \text{Gl. 15}$$

Für die horizontale Streckenlast H_w (siehe Bild 15) gilt:

$$H'_w = H_w \cdot \frac{4D}{l_H} \quad \text{Gl. 16}$$

Die Erddruckverteilung infolge der Baumlasten ist entsprechend der aktuellen Normung anzunehmen.

Hinweis: Für die H'_w -Last ist die Erddruckverteilung sinngemäß wie für eine vertikale Streckenlast anzunehmen (siehe Bild 16a).

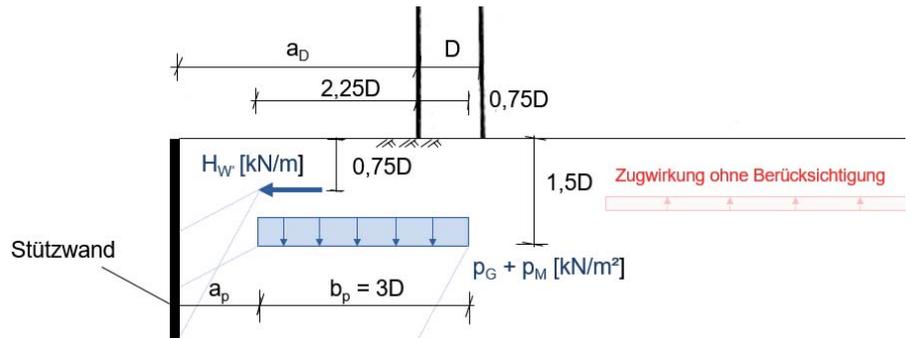


Bild 13: Darstellung der Baumlasten im Schnitt

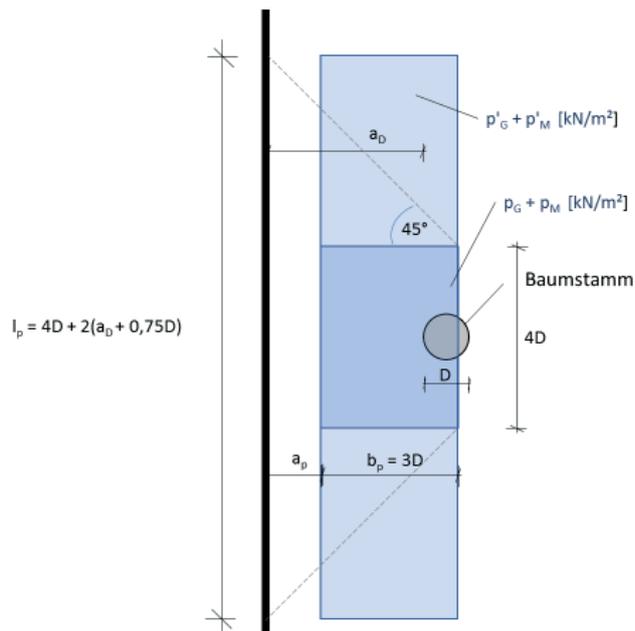


Bild 14: Umwandlung der begrenzten Flächenlast p in eine unbegrenzte Flächenlast p'

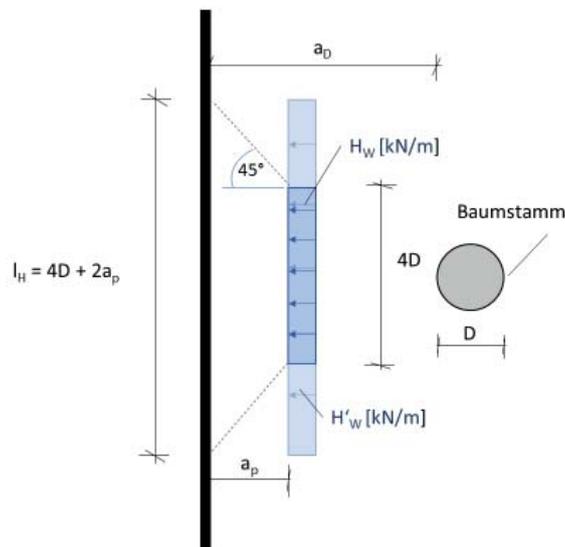


Bild 15: Umwandlung der begrenzten Streckenlast H_w in eine unbegrenzte Streckenlast H'_w

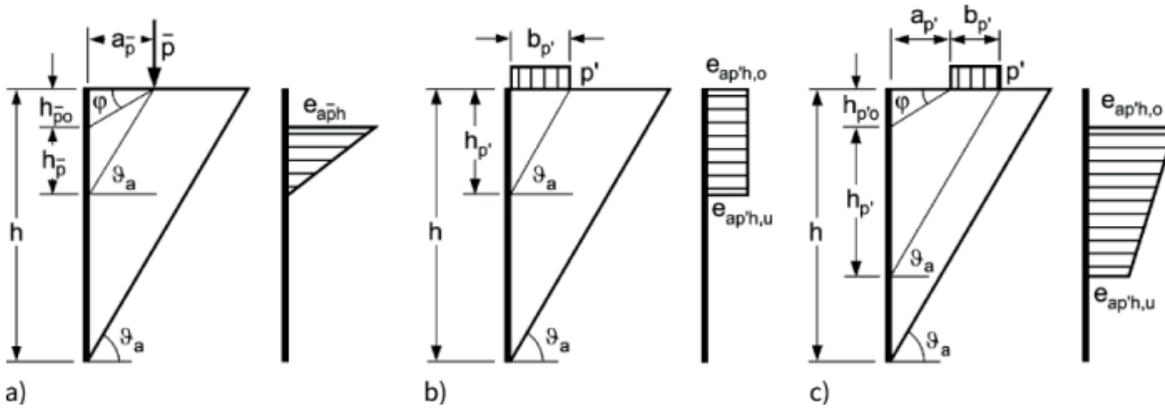


Bild 16: Erddruckverteilung infolge von Geländeauflasten [22]

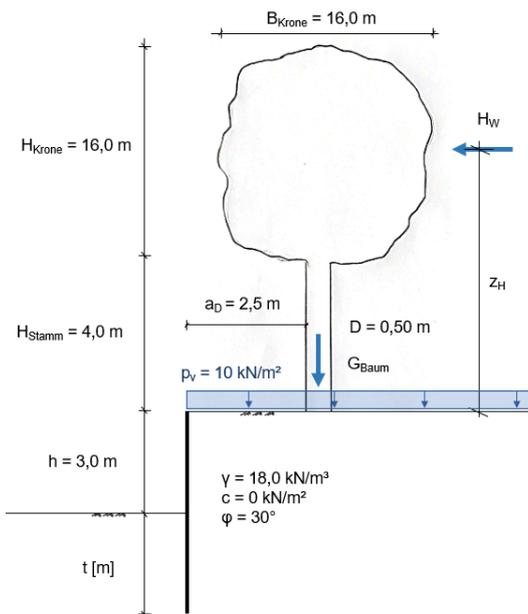


Bild 17: Beispielbaum

5 Beispiel

Gegeben:

Baumart:	Platane
Grünholzwichte:	$\gamma_{Grün} = 11,0 \text{ kN/m}^3$
Baumhöhe:	$H_{Baum} = 20,0 \text{ m}$
Kronenhöhe:	$H_{Krone} = 16,0 \text{ m}$
Kronenbreite:	$B_{Krone} = 16,0 \text{ m}$
Laubfreie Stammhöhe:	$H_{Stamm} = 4,0 \text{ m}$
Stammdurchmesser:	$D = 0,50 \text{ m}$
Luftwiderstandsbeiwert:	$c_w = 0,25$
Formzahl:	$f = 0,70$
Druckfestigkeit des Stammes:	$f_k = 27,0 \text{ MN/m}^2$
Baugrubentiefe:	$h = 3,0 \text{ m}$
Abstand des Baumstammes zum Baugrubenrand:	$a_p = 2,5 \text{ m}$

5.1 Ermittlung des Baumeigengewichts G_{Baum} :

$$G_{Baum} = V_{Baum} \cdot \gamma_{Grün}$$

$$V_{Baum} = A_{Stamm} \cdot H_{Baum} \cdot f$$

$$A_{Stamm} = \pi \cdot \frac{D_{1,0}^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,5^2}{4} = 0,196 \text{ m}^2$$

$$V_{Baum} = 0,196 \cdot 20,0 \cdot 0,7 = 2,74 \text{ m}^3$$

$$G_{Baum} = 2,74 \cdot 11,0 = 30,14 \text{ kN}$$

5.2 Ermittlung der Windlasten: Standort Berlin, Stadtgebiet

Windlastresultierende H_W in Höhe z_H :

$$z_H = H_{Stamm} + 0,6 \cdot H_{Krone}$$

$$z_H = 4,0 + 0,6 \cdot 16,0 = 13,6 \text{ m}$$

nach Tabelle 2: $z_H < z_{min} = 16,0 \text{ m}$:

$$q_p(z_H) = 1,3 \cdot q_b$$

nach Bild 1:

$$q_{b,0} = 0,39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = q_b$$

$$q_p(z_H) = 1,3 \cdot 0,39 = 0,507 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$H_W = q_p(z_H) \cdot A_{Krone} \cdot c_w$$

$$A_{Krone} = r^2 \cdot \pi = 8,0^2 \cdot \pi = 201,1 \text{ m}^2$$

$$H_W = 0,507 \cdot 201,1 \cdot 0,25 = 25,49 \text{ kN}$$

Biegemoment am Stammfuß M_W :

$$M_W = H_W \cdot z_H = 25,49 \cdot 13,6 = 346,7 \text{ kNm}$$

Zum Vergleich: Mit Hilfe der Spezial-Software „Arbostat“ für Baumuntersuchungen (arbosafe GmbH) wird für eine Platane vergleichbarer Größe ein Gewicht von 26,5 kN ermittelt und das Windmoment zu 325 kNm bestimmt. Dabei wurden aber noch keine Sondereffekte in der bodennahen Rauigkeitsschicht, z.B. durch die Umströmung angrenzender Gebäude berücksichtigt. Andererseits wurden mögliche Abschirmungen durch benachbarte Bäume oder Gebäude bewusst ausgespart, da dieser Beitrag speziell auf freistehende Einzelbäume ausgerichtet ist.

Nun wird überprüft, ob das errechnete Biegemoment von 346,7 kNm durch den Stamm aufgenommen werden kann:

$$M_{Rd,St,I} = f_k \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{32} = f_k \cdot W_{St} \text{ (Primärversagen)}$$

$$M_{Rd,St,I} = 27,0 \cdot \pi \cdot \frac{0,5^3}{32} = 27,0 \cdot 0,0123 \cdot 1000 = 331,3 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd,St,II} = 1,8 \cdot M_{Rd,St,I} \text{ (Sekundärversagen)}$$

$$M_{Rd,St,II} = 1,8 \cdot 331,3 = 596,3 \text{ kNm} > 346,7 \text{ kNm}$$

5.3 Berechnung der Baumlasten als begrenzte Strecken- und Blocklasten unterhalb des Wurzelraums

$$F_Z = F_D = \frac{M_W}{5 \cdot D}$$

$$F_Z = F_D = \frac{346,7}{5 \cdot 0,5} = 138,68 \text{ kN}$$

$$p_G + p_M = \frac{(G_{Baum} + F_D)}{12 \cdot D^2}$$

$$p_G + p_M = \frac{(30,14 + 138,68)}{12 \cdot 0,5^2} = 56,27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$H_{W'} = \frac{H_W}{4 \cdot D}$$

$$H_{W'} = \frac{25,49}{4 \cdot 0,5} = 12,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

5.4 Umrechnung der Baumlasten in unbegrenzte Strecken- und Blocklasten

$$p'_G + p'_M = (p_G + p_M) \cdot \frac{4D}{4D + 2(a_D + 0,75D)}$$

$$p'_G + p'_M = 56,27 \cdot \frac{4 \cdot 0,5}{4 \cdot 0,5 + 2(2,5 + 0,75 \cdot 0,5)} = 14,52 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$H'_W = H_{W'} \cdot \frac{4D}{4D + 2a_p}$$

$$a_p = a_D - 2,25D$$

$$a_p = 2,5 - 2,25 \cdot 0,5 = 1,375 \text{ m}$$

$$H'_W = 12,75 \cdot \frac{4 \cdot 0,5}{4 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1,375} = 5,37 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Baumlasten

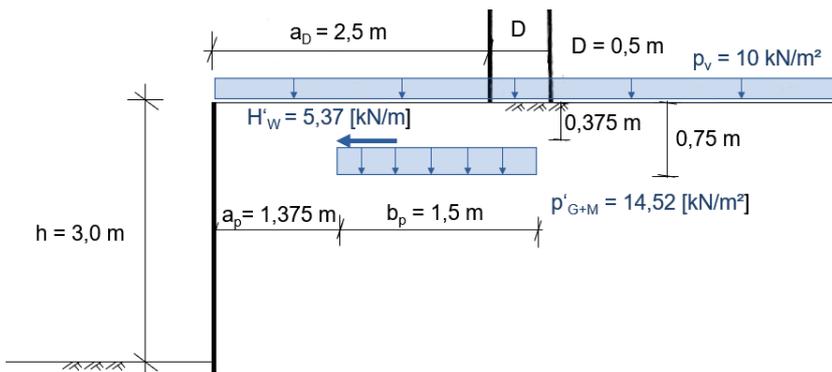


Bild 18: Darstellung der Lasten im Schnitt

5.5 Resultierender Erddruck infolge der einzelnen Lasten (ohne weitere Berechnung)

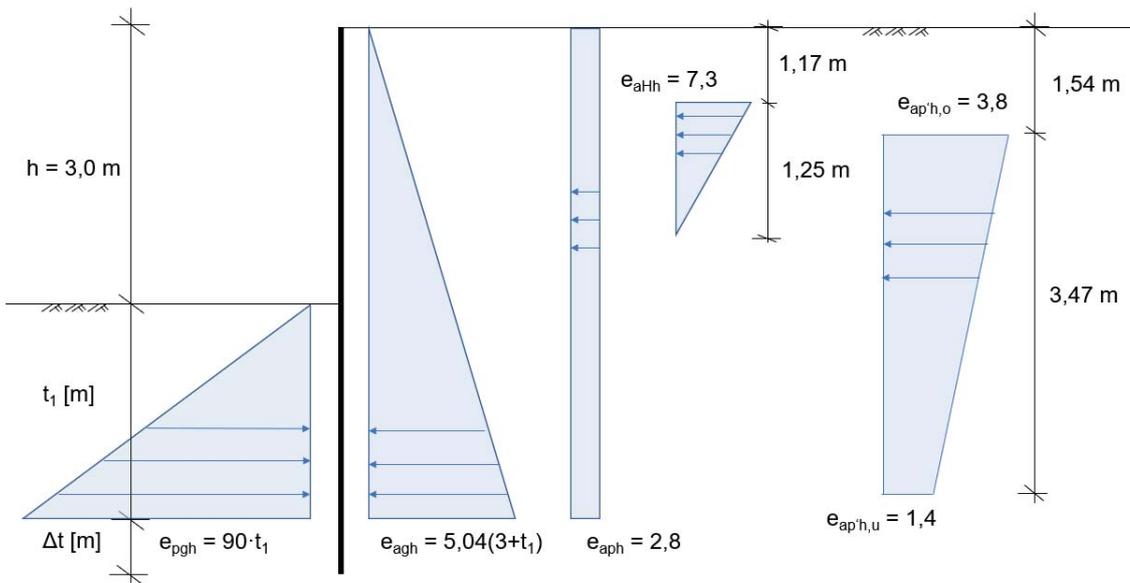


Bild 19: Passiver und aktiver Erddruck in kN/m² (Erddruck infolge Bodeneigengewicht und Geländeauflast: ständiger Lastfall; Erddruck infolge Baumlasten: veränderlicher Lastfall)

5.6 Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe der Spundwand in den Baugrund

Bildung der Summe der Momente um den Wandfußpunkt t_1 :

$$\begin{aligned} \sum M_0 = 0 = & -1,35 \cdot \left(0,5(3 + t_1) \cdot 5,04(3 + t_1) \cdot \frac{1}{3}(3 + t_1) + 2,8 \cdot (3 + t_1) \cdot \frac{1}{2}(3 + t_1) \right) - 1,5 \\ & \cdot \left(4,56(t_1 + 1,41) + 4,86((3 + t_1) - 3,28) + 4,16 \cdot ((3 + t_1) - 2,7) \right) + \frac{1}{1,4} \cdot 45 \\ & \cdot t_1^2 \cdot \frac{1}{3} \cdot t_1 \end{aligned}$$

Die Auflösung der Gleichung nach t_1 ergibt eine erforderliche Einbindetiefe von

$$t_1 = 3,56 \text{ m}$$

5.7 Ermittlung des maximalen Biegemomentes der Spundwand

Bildung der Summe der Horizontalkräfte

$$\sum H = 0 = -1,35 \cdot (0,5(3 + t_M) \cdot 5,04(3 + t_M) + 2,8 \cdot (3 + t_M)) - 1,5 \cdot (4,56 + 9,02) + \frac{1}{1,4} \cdot 45t_M^2$$

Nach Auflösung der Gleichung nach t_M ergibt sich

$$t_M = 1,95 \text{ m (= Querkraftnullpunkt)}$$

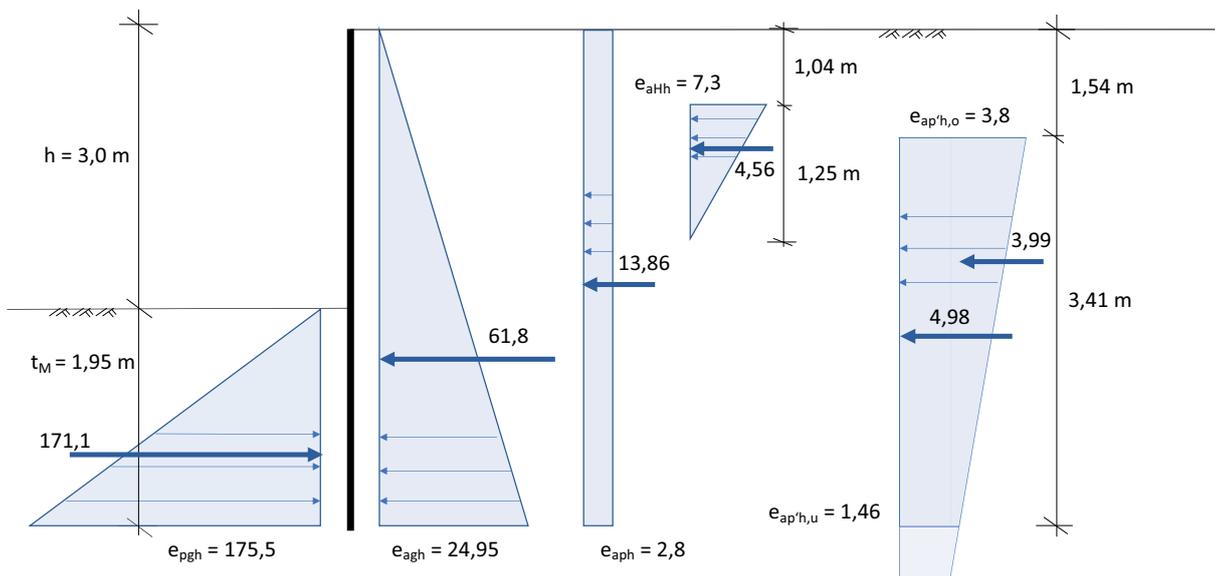


Bild 20: Passiver und aktiver Erddruck in kN/m²

Bildung der Summe der Momente um den Punkt in der Tiefe t_M :

$$\sum M = -1,35 \cdot (61,8 \cdot 1,65 + 13,86 \cdot 2,48) - 1,5 \cdot (4,56 \cdot 3,49 + 4,98 \cdot 1,71 + 3,99 \cdot 2,27) + \frac{1}{1,4} \cdot 171,1 \cdot 0,65$$

Es ergibt sich ein maximales Biegemoment von

$$M = 154,89 \text{ kNm}$$

Das maximale Moment ohne die Baumlasten beträgt nur 106,45 kNm (aus Nebenrechnung). Unter Berücksichtigung der Baumlasten ergibt sich ein Zuwachs von 45,5 %.

6 Schluss und Ausblick

Der vorliegende Aufsatz stellt eine ingenieurmäßige und praxisgerechte Grundlage zur Ermittlung von Baumlasten für die Bemessung von Stützbauwerken vor.

Den Autor:innen ist bewusst, dass der vorgestellte Ansatz eine einfache und auf der sicheren Seite liegende Annäherung an das Thema darstellt. Weitere Untersuchungen dazu werden als wünschenswert angesehen.

So ist beispielsweise eine 3-D-Berechnung mit einem geeigneten EDV-Programm (z.B. PLAXIS) denkbar, bei der dann auch die Baumwurzel zu modellieren ist (siehe z.B. [23]). Die Autor:innen vermuten, dass bei genauere Modellierung deutlich kleinere Kräfte auf die Stützwand einwirken. Dabei könnte sich die Richtung der H-Last sogar umkehren.

Ebenso sollte durch weitere Vergleichsrechnungen eine mögliche Vereinfachung der

Baumlasten in Form einer unbegrenzten und konstanten Ersatzflächenlast auf der Geländeoberfläche untersucht werden. Dabei sind insbesondere die Randbedingungen für eine solche Ersatzlast festzulegen und zu formulieren (Abstand der Bäume untereinander, Abstand der Bäume vom Stützbauwerk, Höhe des Geländesprungs usw.).

Hinweise und Anregungen aus der Fachöffentlichkeit werden gerne entgegengenommen.

Literatur

- [1] Wessolly, L., Erb, M., Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle, Berlin-Hannover: Patzer Verlag, 2014
- [2] Lavers, G., The strength properties of timber, 3rd ed. Building Research Establishment Report, 1983
- [3] Niklas, K., Spatz, H.-Chr., Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany* 97, 1587–1594, 2010
- [4] Rust, S., Analysis of regional variation of height growth and slenderness in populations of six urban tree species using a quantile regression approach. *Urban Forestry & Urban Greening* 13, 336–343, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.003>
- [5] Dahlhausen, J., Biber, P., Rötzer, T., Uhl, E., Pretzsch, H., 2016. Tree Species and Their Space Requirements in Six Urban Environments Worldwide. *Forests* 7, 111. <https://doi.org/10.3390/f7060111>
- [6] McPherson, E.G., van Doorn, N.S., Peper, P.J., n.d. Urban tree database. <https://doi.org/10.2737/RDS-2016-0005>
- [7] Vaz Monteiro, M., Doick, K.J., Handley, P., 2016. Allometric relationships for urban trees in Great Britain. *Urban Forestry & Urban Greening, Special Section: Power in urban social-ecological systems: Processes and practices of governance and marginalization* 19, 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.07.009>
- [8] Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., Seifert, T., Toit, B. du, Farnden, C., Pauleit, S., 2015. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening* 14, 466–479. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006>
- [9] Gasch, R., Twele, J., Windkrafanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 5. Auflage, Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2007, pp. 123–134
- [10] Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten: DIN EN 1991-1-4:2010-12
- [11] Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten: DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12
- [12] Ruck, B., Über die Aerodynamik der Bäume, Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmechanik, 6.–8.9.2005, BTU Cottbus
- [13] Detter, A., Muir, P., Praus, L., Rust, S., 2022. Sachgerechter Einsatz von Zugversuchen. Anforderungen an Anwender, Messverfahren, Auswertungsmethoden und Gutachten. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.) *Jahrbuch der Baumpflege*. 2022 (im Druck)
- [14] Deutscher Wetterdienst [Online]. Available: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100310&lv3=100390>. [Zugriff am 1.1.2021]
- [15] Köstler, N., Brückner, E., Bibelriether, H., Die Wurzeln der Waldbäume, Hamburg-Berlin: Verlag Paul Parey, 1968
- [16] Sinn, G., Baustatik: Stand- und Bruch-sicherheit von Bäumen an Straßen, in Parks und der freien Landschaft, Braunschweig: Thalacker Medien, 2003
- [17] Detter, A., Rust, S., Grundlagen und Kriterien zur visuellen Beurteilung der Standsicherheit von Bäumen, *Jahrbuch der Baumpflege*, 22. Jahrgang, S. 145–160, 2018
- [18] Yang, M., Défossez, P., Danjon, F., Fourcaud, T., 2018. Analyzing key factors of roots and soil contributing to tree anchorage of Pinus species. *Trees* 32, 703–712. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1665-4>
- [19] Coutts, M.P., Root architecture and tree stability, *Plant and Soil* 71, pp. 171–188, 1983
- [20] Coutts, M.P., Components of Tree Stability in Sitka Spruce on Peaty Gley Soil, *Forestry*, Vol. 59, No. 2, pp. 173–197, 1986
- [21] Detter, A., Gutachten: Konzept zur langfristigen Entwicklung eines Baumbestandes, Augsburg: TreeConsult Brudi & Partner, 2018
- [22] Witt, K.J., Hrsg., Grundbau-Taschenbuch: Teil 1. Geotechnische Grundlagen, 8. Auflage, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2017
- [23] Dupuy, L., Fourcaud, T., Stokes, A., A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage, *Plant and Soil* 278, pp. 119–134, 2005
- [24] Detter, A., Richter, K., Rust, C., Rust, S., 2015. Aktuelle Untersuchungen zum Primärversagen von grünem Holz. In: D. Dujesiefken (Hrsg.) *Jahrbuch der Baumpflege*, S. 156–167, 2015



Prof. Dipl.-Ing. Frank Prietz
Berliner Hochschule für Technik

GSE Ingenieur-Gesellschaft mbH
Von-der-Gablenz-Str. 19
13403 Berlin

www.gse-berlin.de



Emilia Fiks, M.Eng.
Berliner Hochschule für Technik

GSE Ingenieur-Gesellschaft mbH
Von-der-Gablenz-Str. 19
13403 Berlin

www.gse-berlin.de



Dipl.-Ing. Andreas Detter
öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger

Brudi & Partner TreeConsult,
Baumsachverständige
Berengariastr. 9
82131 Gauting
Tel. 089/752150

www.tree-consult.org