

ÜBER DIE AERODYNAMIK DER BÄUME

Bodo Ruck

Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 76228 Karlsruhe, www.umweltaerodynamik.de

Zusammenfassung

Mit Hilfe von Methoden der Laser-Anemometrie konnten in den vergangenen Jahren am Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik eine Reihe von Untersuchungen im Bereich der Aerodynamik von natürlichen Strukturen durchgeführt werden, siehe z.B. Ruck et al. 1986, 1991, Donat et al. 1999, Frank et al. 2005. Ein besonderer Augenmerk galt hierbei der Aerodynamik des Baumes oder von Baumbeständen. Der Baum stellt strömungsphysikalisch ein permeables Hindernis dar, das um- und durchströmt wird und zudem noch flexibel reagiert, d.h. dynamisch auf Windkräfte reagiert. Charakteristisch für solche permeablen Hindernisse ist, dass aerodynamische Phänomene wie etwa Ablösungsvorgänge, die wir aus der Umströmung von nicht-permeablen Strukturen bestens kennen, durchaus auch auftreten, allerdings räumlich, je nach Permeabilität, in Richtung stromab verschoben werden.

Im Rahmen dieses Beitrages werden die grundlegenden Zusammenhänge der Aerodynamik des Baumes/der Bäume aufgezeigt, wobei insbesondere auf Untersuchungen mit Methoden der Laser-Anemometrie eingegangen wird.

1. Einleitung

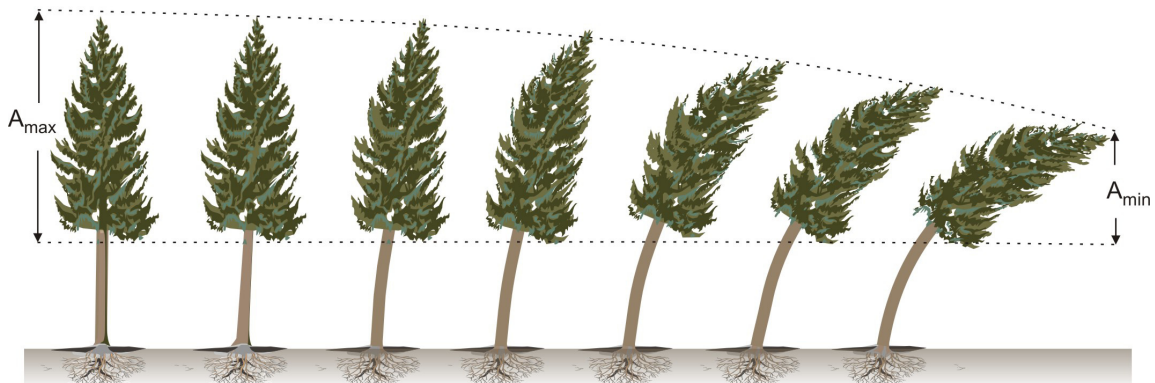
Bäume sind für den Menschen lebenswichtig und erfüllen eine Vielzahl von Funktionen. Hierunter fallen u.a. die lebenswichtige Produktion von Sauerstoff und das Herausfiltern von schädlichen Aerosolen aus der Atemluft, die Produktion von Früchten, die Nachlieferung des Rohstoffes Holz, wovon eine ganze Industrie abhängt, die Schattenspende und die effektive Verdunstung von Wasser in Hitzregionen, was zur Wolkenbildung beiträgt, der Windschutz von landwirtschaftlichen Anbauflächen, der Schutz vor Lawinen im Hochgebirge, die Stabilisierung von Hängen in Bergregionen und die Vergleichmäßigung des Erdklimas. Die Liste ließe sich beliebig verlängern und reicht bis hin zur gesellschaftlichen Funktion von Wäldern als Erholungsraum. Viele mit diesen Funktionen zusammenhängende Prozesse laufen unter Beteiligung der atmosphärischen Grenzschichtströmung ab, d.h. der Baum wird hierbei durch- und umströmt.

Trotz dieser immensen Bedeutung für die Natur und den Mensch und seine Lebensfähigkeit, wurde der Baum unter aerodynamischen Gesichtspunkten bislang nur vereinzelt untersucht (siehe z.B. Mayer, H., 1978, Holbo et al. 1980, Johnson et al. 1982, Amtmann 1986) und manche Strömungsphänomene werden heute noch nicht richtig verstanden. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass der Baum oder das Baumkollektiv eine flexible und in der Form wandelbare, Reynoldszahl-abhängige Struktur verkörpert, die zudem große Abmaße aufweist und sich kaum für Windkanaluntersuchungen im Originalmaßstab eignet.

2. Verformung unter Windlast

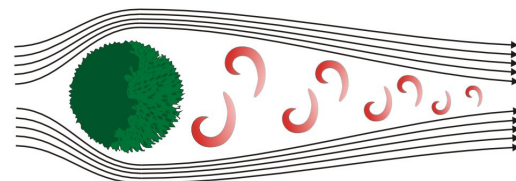
Bäume neigen sich unter Windlast und richten bei höheren Geschwindigkeiten ihre Blätter und Zweige nach dem Wind aus. Durch die Windlast biegt sich einerseits der Stamm, und andererseits wird sich die Krone bei zunehmender Windgeschwindigkeit zusammendrücken und verkleinern. Abb. 1 zeigt die Verformungsvorgänge unter Windeinfluss.

Windbedingte Neigung des Baumes und Verformung der Krone



Beobachtung:

1. Neigung des Baumes
 - Biegung des Stammes
2. Verformung der Krone
 - Verkleinerung der Stirnfläche zum Wind
 - Verkleinerung des Kronenvolumens (Verdichtung)
 - Verringerung des Reibungswiderstandsbeiwertes
 - Absinken des Kronenschwerpunkts



Gleichzeitige Wirbelbildung an der Krone

Windprofil ist nicht konstant mit der Höhe $u(z) \neq \text{const.}$

Projektionsfläche in Strömungsrichtung bleibt nicht konstant

Porosität und Form verändert sich als Funktion der Windgeschwindigkeit

Dichte der Luft

$$F_w = \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \cdot A \cdot c_w$$

Windgeschwindigkeit

Projektionsfläche des Baumes in Strömungsrichtung

Widerstandsbeiwert des Baumes (Formeinfluss)

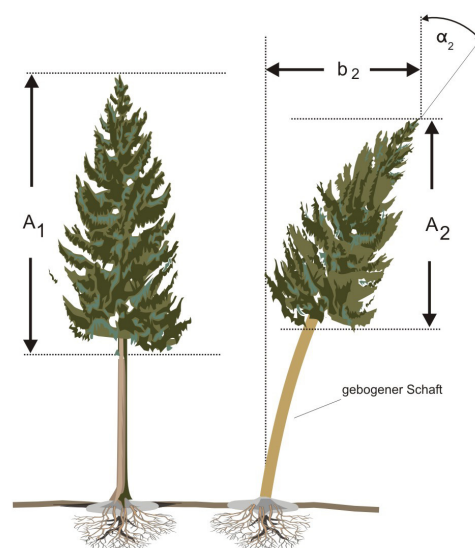
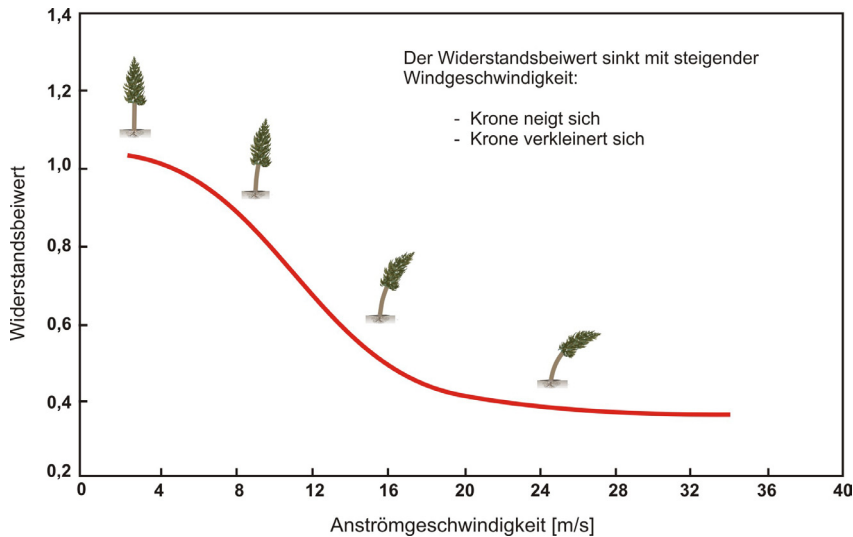


Abb. 1: Veränderung der Baumes infolge Windanströmung

3. Widerstandsbeiwerte

Der Widerstandsbeiwert von Bäumen verändert sich relativ stark mit der Anströmgeschwindigkeit, was auf Windausrichtungsphänomene zurückzuführen ist. Er sinkt mit zunehmender Geschwindigkeit, wie es in Abb. 2 zu sehen ist. Hierbei ist anzumerken, dass der cw-Wert bei kleinen Windgeschwindigkeiten keineswegs beim Wert 1 beginnen muss, sondern auch



höhere Werte realistisch sind. Selbstverständlich nimmt die Windkraft auf den Baum mit zunehmender Windgeschwindigkeit ständig zu, da trotz Absinken des cw-Wertes eine Proportionalität zum Quadrat der Windgeschwindigkeit besteht. In Abb. 3 werden cw-Werte von natürlichen Bäumen wiedergegeben, die durch 1:1 Messungen in großen Flugzeugwindkanälen erhalten werden konnten.

Abb. 2: Verlauf des Widerstandsbeiwertes bei natürlichen Bäumen

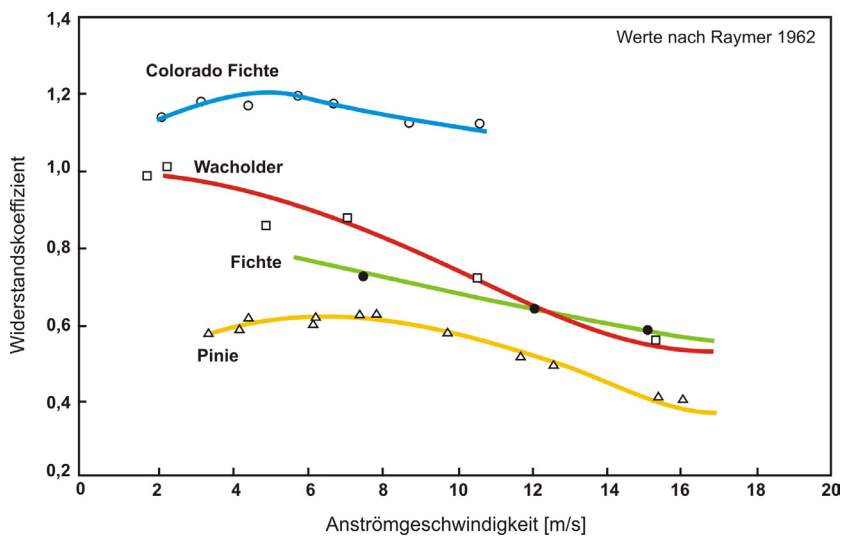


Abb. 3: Widerstandsbeiwerte von natürlichen Bäumen

Anhand der Kurvenverläufe sieht man, dass der cw-Maximalwert nicht immer bei den kleinsten Geschwindigkeiten liegt, sondern dass manche Bäume mit zunehmender Windgeschwindigkeit zuerst ein cw-Maximum durchlaufen, bevor dann der erwähnte Abfall einsetzt. Verantwortlich hierfür scheint das initiale Umbiegen der Frontzweige auf die Seite zu sein und das damit verbundene Verdichten des äußeren Kronenbereichs. Erst bei weiterer Erhöhung der Windgeschwindigkeit treten dann signifikantere Windausrichtungsphänomene auf, die in summa eine Abnahme des cw-Wertes bewirken. Weitere gemessene Widerstandsbeiwerte finden sich bei Raymer 1962 und Mayhead 1973.

Die Widerstandsbeiwerte sinken mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab, was auf Windausrichtungsphänomene zurückzuführen ist. Die Widerstandsbeiwerte sind bei kleinen Windgeschwindigkeiten nicht immer bei 1, sondern können auch höhere Werte annehmen. Die Widerstandsbeiwerte sind bei kleinen Windgeschwindigkeiten nicht immer bei 1, sondern können auch höhere Werte annehmen.

4. Das Strömungsfeld um den Baum

Das Strömungsfeld um den Baum wurde in verschiedenen Messreihen durch LDA-Messungen in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal erfasst. Zum Einsatz kam ein Argon-Ionen-Laser-2D-LDA-System, das in Vorwärtsstreuung arbeitete, siehe Abb. 4.

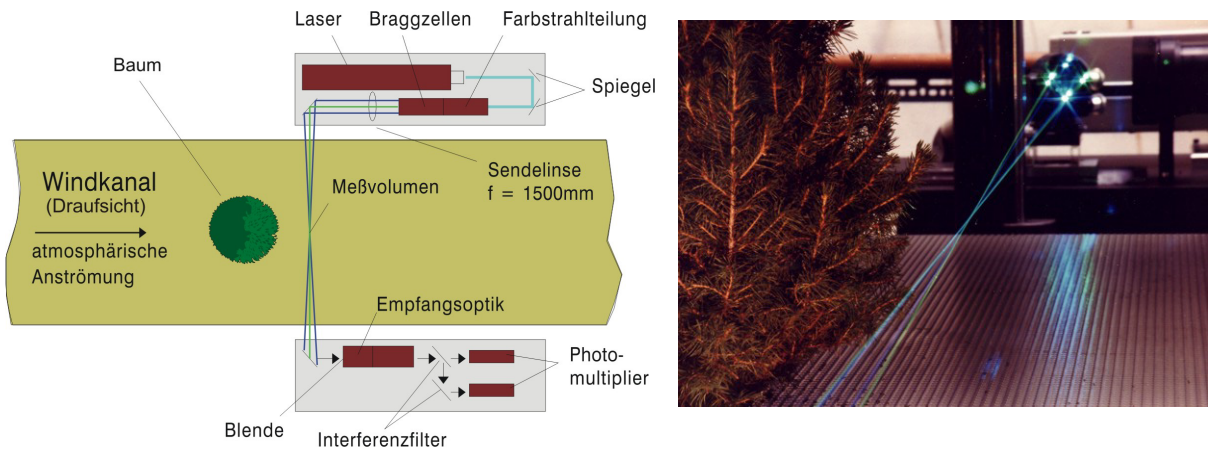


Abb. 4: 2D-LDA-System im atmosphärischen Grenzschichtwindkanal

Hierbei zeigte sich, dass das Strömungsfeld von Bäumen charakteristische Eigenheiten im Vergleich zur Umströmung stumpfer Körper aufweist. Die Permeabilität des Hindernisses bewirkt z.B., dass Ablösephänomene zwar noch auftreten, jedoch z.T. nach stromab verschoben werden.

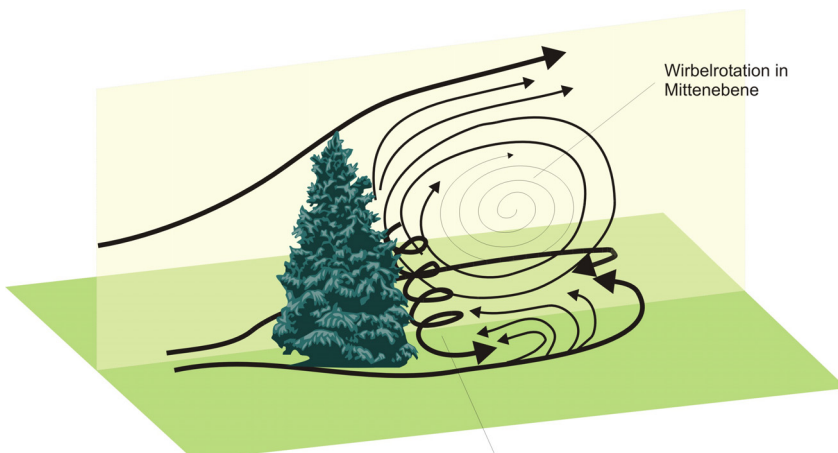


Abb. 5: Wirbelfeld hinter einem Einzelbaum (Ruck & Schnitt 1986)

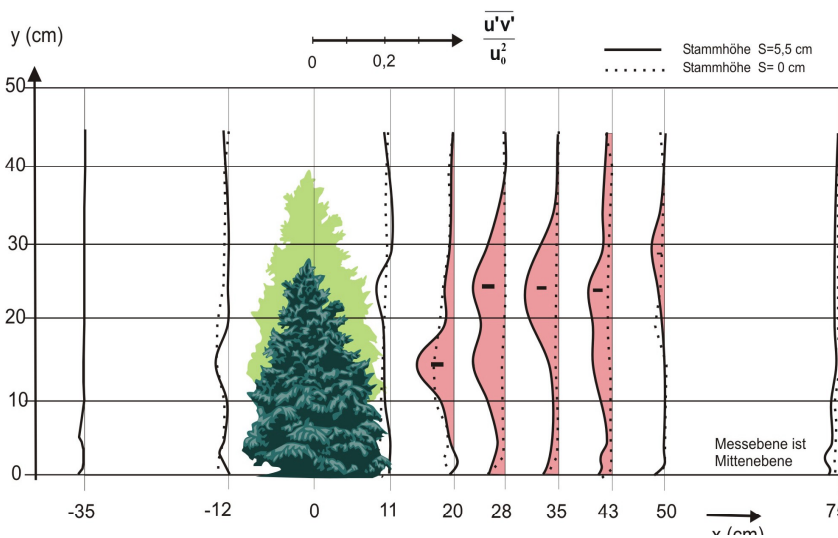


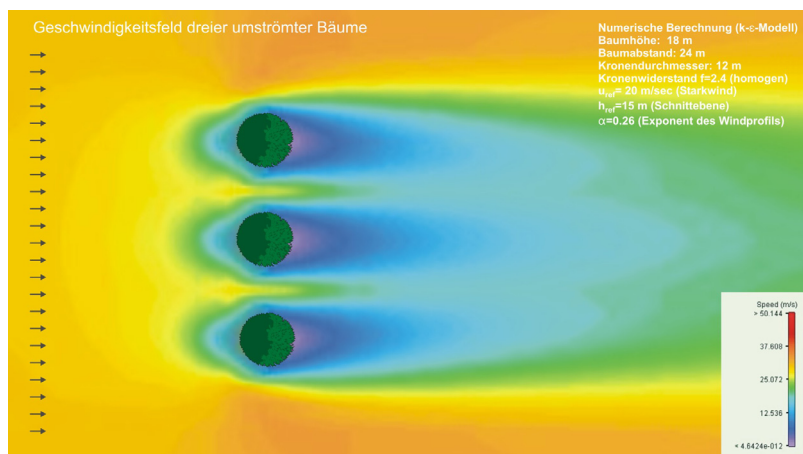
Abb. 6: Schubspannung hinter einem Einzelbaum (*picea glauca conica*) aus LDA-Messungen

Die rezirkulierende Masse und Ihre Rotationsgeschwindigkeit sind dabei deutlich vermindert im Vergleich zu Ablösegebieten hinter stumpfen Körpern. In den Abbildungen 5 und 6 werden für einen Einzelbaum (*picea glauca conica*) das Strömungsfeld skizziert und Messungen der Schubspannung wiedergegeben. Wie man sieht existiert hinter einem solchen Einzelbaum in der Mittenebene ein großer Hauptwirbel, der von zwei hierzu fast senkrecht stehenden Seitenwirbeln flankiert wird. Aus Abb. 6 kann entnommen werden, dass hinter einem Einzelbaum die Impulstransport in Richtung Boden deutlich verstärkt wird (negative Schubspannung). Abb. 7 zeigt Berechnungen des horizontalen Windfeldes.



Abb. 7: Verlauf der (mittleren) horizontalen Windgeschwindigkeit bei der Einzelbaumumströmung

Wie in Abb. 7 zu erkennen ist, senkt der Baum vor allem im Lee das Windgeschwindigkeitsniveau beträchtlich. Windreduktionen bis zu 80% sind keine Seltenheit. Zu berücksichtigen gilt in diesem Zusammenhang, dass neben der windschützende Wirkung von Bäumen hinsichtlich der mittleren Windgeschwindigkeit, das Turbulenzniveau im Leegebiet aber stets etwas ansteigt, so dass der Nettoschutzeffekt von Bäumen zwar immer noch signifikant ist, aber durch die erhöhte Turbulenz etwas verkleinert wird.



Bemerkenswert ist bei der Umströmung von mehreren nebeneinander angeordneten Bäumen, dass deren Leegebiete (windgeschützte Bereiche) sich trotz eines diskreten Baumabstandes zu einem gemeinsamen Gebiet von geringer Windgeschwindigkeit vereinen, siehe Abb. 8.

Abb. 8: Geschwindigkeitsverteilung hinter 3 nebeneinander stehenden Bäumen (Schnitt in mittlerer Kronenhöhe)

5. Das Druckfeld um den Baum

Das Druckfeld um den Einzelbaum zeigt keine Überraschungen aus strömungsmechanischer Sicht. Der Aufstau der Luft führt zu einem Überdruck auf der Luvseite und zu einem leichten Unterdruck auf der Leeseite, wie dies in Abb. 9 wiedergegeben wird. Stehen Bäume hintereinander, so stehen sie im Windschatten des vorangehenden und die Druckdifferenz zwischen Luv- und Leeseite baut sich rasch von Baumreihe zu Baumreihe ab.

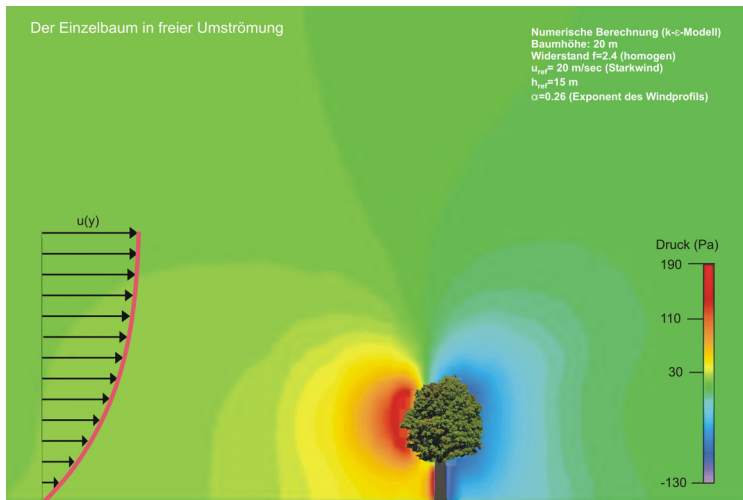
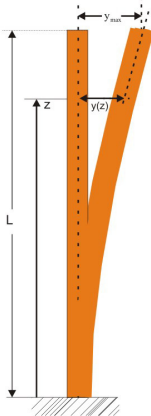


Abb. 9: Das Druckfeld um den umströmten Einzelbaum

6. Die Dynamik des Baumes

Die bislang dargelegten Zusammenhänge bezogen sich auf die Beschreibung mittlerer, statistisch erfasster Strömungsfeld- oder Druckfeldgrößen. Nun findet man selten „mittlere“ atmosphärische Strömungen, sondern der Wind enthält üblicherweise Böen, die im Falle von Starkwinden (z.B. Orkanen) charakteristisch ca. 2-3- sec

andauern und Windgeschwindigkeitsspitzen bis über 40 m/sec aufweisen können. In einer solchen böenreicher Anströmung zeigt der Baum oder der Baumbestand eine Eigendynamik, die Rückwirkungen auf das Strömungsfeld zeitigt. Für den Einzelbaum bedeutet dies das Auslenken bzw. das Hin- und Herwippen im Wind, wobei durch diese Schwingungsbewegung der Abriss von Wirbeln getriggert wird. Der Baum wirkt hierbei vielfach als schwingungsfähiges Gebilde, siehe Abb. 10, das neben den Materialeigenschaften in seiner Dynamik bestimmt wird durch die Windlast auf die Krone (meist als zeitveränderliche Punktlast angenommen) und durch das Eigengewicht des Baumes. Bei Baumbestände kann insbesondere im gleichaltrigen Bestand (Eigenschwingungsverhalten siehe Abb. 11) durch eine Starkwindböe das Kronendach großflächig aufreißen, siehe Abb. 12, was die weniger stabilen inneren Bestandbäume augenblicklich der Windkraft aussetzt, der sie häufig nicht standhalten können, siehe auch Wood 1985 und Irvine et al. 1987.



Biegeschwingung wird durch Differentialgleichung beschrieben (Eulersche Gleichung für Biegeschwingungen):

$$\rho_B \cdot A_B \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + E \cdot I \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} = 0$$

Verwendung folgenden Ansatzes für die Auslenkung als Funktion von z:

$$y(z, t) = y_0(z) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

liefert eine gewöhnliche Differentialgleichung für die Schwingungsamplitude $y_0(z)$

$$y_0(z) = y_{0,1} \cdot \cos(\alpha_k \cdot z) + y_{0,2} \cdot \sin(\alpha_k \cdot z) + y_{0,3} \cdot \cosh(\alpha_k \cdot z) + y_{0,4} \cdot \sinh(\alpha_k \cdot z)$$

wobei sich die Eigenwerte α_k wie folgt berechnen (k: Ordnung der Eigenschwingung):

$$\alpha_k = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{\rho_B \cdot A_B}{E \cdot I}}}$$

bzw. die Eigenfrequenzen sich ergeben zu:

$$f_k = \frac{\alpha_k^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho_B \cdot A_B}}$$

}

k = 1: $\alpha_1 = 1,875 / L$

k = 2: $\alpha_2 = 4,694 / L$

k = 3: $\alpha_3 = 7,855 / L$

k ≥ 4: $\alpha_k = \frac{(k - 1/2) \pi}{L}$

E: Elastizitätsmodul des Holzes in N / m²

I: Flächenträgheitsmoment des Baumstammquerschnitts in m⁴

A_B: Querschnittsfläche des Baumstammes in m²

ρ_B: Dichtes des Stammholzes in kg / m³

Abb. 10: Gleichung der freien ungedämpften Biegeschwingung für den senkrechten Balken

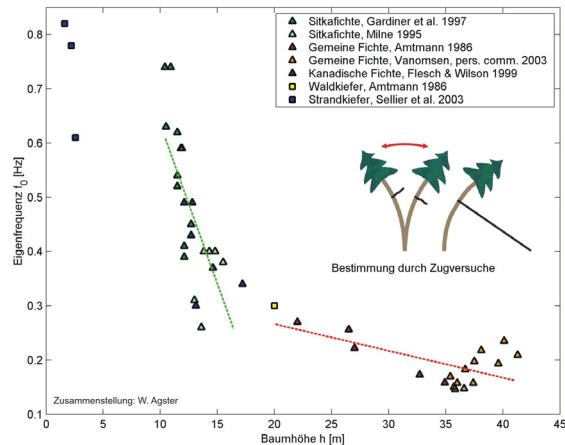


Abb. 11: Eigenschwingungsverhalten von Bäumen als Funktion des Baumalters

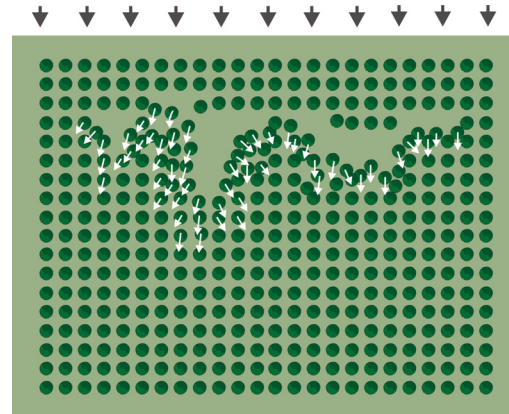


Abb. 12: Großflächiges Aufreißen des kantennahen Kronendachs

Von entscheidender Bedeutung ist für diese Fälle das Verhältnis von Schwingungsdauer des Baumes zu Böendauer. Nur wenn die Böendauer lang genug und die Böengröße groß genug ist, kann die Böe ein Maximum an Windlast auf den Baum bewirken.

Dankesworte

Der Autor möchte an dieser Stelle der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Projektträgergesellschaft PEF/BWplus und der Bundesstiftung Umwelt für die Förderung verschiedener Projekte zum Thema danken, deren Ergebnisse in diesem Konferenzbeitrag mit verwendet wurden. Der Fa. FLOMERICS sei Dank für die Überlassung des CFD-Codes FLOVENT.

Literatur

- Amtmann, R., 1986:** "Dynamische Windbelastung von Nadelbäumen", *Forstliche Forschungsberichte München* 74, ISSN 0174-1810
- Donat, J., Ruck, B., 1999:** "Simulated Ground Deposition of Fine Airborne Particles in an Array of Idealized Tree Crowns", *Boundary Layer Meteorology*, 93, pp. 469-492
- Frank, C., Ruck, B., 2005,** "Double-arranged mound-mounted shelterbelts: influence of porosity on wind reduction between the shelters", *Environmental Fluid Mechanics*, (2005) 5, pp. 267-292
- Holbo, H.R., Corbett, T.C., Horton, P.J., 1980:** Aeromechanical behavior of a selected Douglas-fir, *Agricultural Meteorology* 21, pp. 81-91
- Irvine, M.R. and Gardiner, B.A. and Hill, M.K., 1997:** The evolution of turbulence across a forest edge. In: *Boundary layer meteorology*, 84, S. 467-496
- Johnson, R.C., Ramey, G.E., O'Hagen, D.S., 1982:** Wind induced forces on trees, Transactions of the ASME, *Journal of Fluids Engineering*, March 1982, Vol. 104, pp. 25-30
- Mayer, H., 1978:** "Kenngrößen des vertikalen Windprofils in und über einem Fichtenwald". In: *Agricultural Meteorology*, S. 275-293
- Mayhead, G.J.:** "Some Drag Coefficients for British Forest Trees Derived from Wind Tunnel Studies". In: *Agric. Meteorol.* 12 (1973), S. 123-130
- Raymer, W.G., 1962:** Wind resistance of conifers, National Physical Laboratory, *Aeronaut. Report.* 1008
- Ruck, B., Schmitt, F., 1986:** "Das Strömungsfeld der Einzelbaumströmung, Abschätzung von Depositionswahrscheinlichkeiten für Feinsttröpfchen", *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 105/86, 3, 178-196
- Ruck, B., Adams, E., 1991:** " Fluid Mechanical Aspects in the Pollutants Transport to Coniferous Trees", *Boundary Layer Meteorology*, 56, 163-195
- Wood, C.J., 1995:** 'Understanding wind forces on trees', in M.P. Coutts and J. Grace (eds) *Wind and Trees*, Cambridge University Press, 133-164