

Einfluss von Brennweite, Entfernung und Himmelsrichtung auf die Schätzung der Windlast von Bäumen im Rahmen von Zugversuchen

Uncertainty of wind load estimates from crown photos

von Fabian Collet, Alexander Vögeli, Andreas Detter, Steffen Rust und Catherina Rust

Zusammenfassung

Die Schätzung der Windlast ist ein wesentlicher Teil von statischen Zugversuchen zur Untersuchung der Verkehrssicherheit von Bäumen. Dazu wird die Silhouette des Baumes auf einem Foto verwendet, um die Größe und Verteilung der dem Wind ausgesetzten Fläche zu ermitteln. Ziel dieser Untersuchung war, die mit diesem Verfahren verbundene Unsicherheit zu erfassen. Dazu wurden 24 Birken aus den vier Haupthimmelsrichtungen und unterschiedlichen Entfernungen fotografiert und ihre Windlast mit ArboStat geschätzt.

Dieser Teil der Windlastschätzung enthält einen systematischen und einen zufälligen Fehler. Je weiter man sich bei der Aufnahme des Kronenfotos vom Baum entfernt, desto geringer wird die geschätzte Windlast. Da man in der Praxis meist recht nah am Baum stehend fotografieren muss, liegt dieser Fehler auf der „sicheren“ Seite der Sicherheitsaussage. Die zufällige Fehlerstreuung war größer. Wertet man nur ein Kronenfoto aus, dann schloss für unsere Daten der 95 %-Vertrauensbereich knapp die Hälfte des Messwertes ein. Bei Bäumen mit einem Sicherheitsfaktor um 1,5 ist daher in vielen Fällen die Auswertung mehrerer Kronenfotos sinnvoll.

Summary

Evaluation of static pulling tests requires estimation of a design wind load. This is derived from a silhouette of the tree drawn on a digital picture. Here we analyze the uncertainty involved in this estimate from the variation in pictures of 18 birch trees taken from the four cardinal directions, and from different distances.

There was a systematic error linearly related to the distance. Wind load decreased by 2 % for every 10 m increase in distance. Random variation was higher. The 95 % confidence band was approximately half the mean.

For trees with a factor of safety close to 1.5, we recommend analyzing more than one independently taken picture.

1 Einleitung

Seit langem ist Wind eine der größten Bedrohungen für Bäume im Wald und in der Stadt (METZGER 1893; JACOBS 1936; MERGEN 1954). Bei der Anwendung von Zugversuchen an Bäumen ist es daher wichtig, ihre Windlast

einzuschätzen. Die Windlast steigt proportional zur Fläche, auf die der Wind wirkt und noch stärker mit der Windgeschwindigkeit (METZGER 1893; TIREN 1928; NIKLAS 1992; VOGEL 1994; CULLEN 2005). Mit steigender Windgeschwindigkeit sinkt allerdings auch der Luftwiderstand der Krone (YLINEN 1953) durch die Veränderung der

Kronen- und Blattform (VOGEL 1989, 2009). Da diese Geschwindigkeit mit der Höhe über dem Boden ansteigt (PRANDL 1932; YLINEN 1953; DAVENPORT 1960), ist auch die Verteilung der Fläche über die Höhe wichtig.

Statische Zugversuche dienen dazu, die Verkehrssicherheit von Bäumen einzuschätzen. Die Methodik umfasst eine erhebliche Zahl von Messungen und Schätzungen, die am Ende zu einem Sicherheitsfaktor verrechnet werden (DETTNER & RUST 2013). Eine solche Verkettung von Werten, die alle mit Unsicherheiten behaftet sind, hat grundsätzliche Kritik an der Belastbarkeit der Ergebnisse dieses Verfahrens hervorgerufen (z. B. RINN 1995). Nachdem RUST (2014) bereits Hinweise für den Umgang mit den Messungen von Baumhöhe und -durchmesser sowie Stammdehnungen, -neigungen und Biegemomenten gegeben hat, soll hier untersucht werden, wie groß die Unsicherheit bei der Abschätzung der Windlast aus einem Foto des Baumes ist.

2 Material und Methoden

2.1 Standort und Bäume

Die 24 Birken (*Betula pendula* ROTH) standen in mehreren parallelen Reihen auf einem Parkplatz gegenüber des Wildparkstadions in Karlsruhe und waren zwischen 13 m und 25 m hoch sowie etwa 15 bis 35 Jahre alt.

2.2 Kronenfläche und Windlast

Zunächst wurden die Bäume aus jeder Himmelsrichtung mit dem kleinstmöglichen Abstand so fotografiert, dass sie noch ganz erfasst wurden. Anschließend kamen zwei weitere Entfernungen hinzu, bei denen zusätzlich die Brennweite verändert wurde. Das ergab von den meisten Bäumen aus jeder Himmelsrichtung fünf Fotos. Dies war allerdings nicht bei jedem Baum möglich, da die äußerste Baumreihe an eine Straße grenzte. Für jedes Bild wurden in Arbostat, einer Analysesoftware zur Auswertung von Zugversuchen, Kronenflächen und Bemessungswindmomente für eine Referenzgeschwindigkeit von 22,5 m/s (Windzone 1, DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12) geschätzt. Die Baumhöhe wurde mit einem Laserhypsometer jeweils dreimal gemessen.

2.3 Statistik

Der Einfluss des Aufnahmeabstandes, der Brennweite der Aufnahme und der Himmelsrichtung wurde im Statistikprogramm R mithilfe von generalisierten gemischten Modellen untersucht.

3 Ergebnisse

Die Kronenfläche variierte zwischen den einzelnen Aufnahmen. Dabei hatte die Brennweite keinen signifikanten Einfluss auf die Kronenfläche. Der Effekt des Abstandes ist im Bereich zwischen 10 m und 40 m linear: Je Meter Abstandsänderung nahm die Kronenfläche um $0,31 \text{ m}^2 \pm 0,07 \text{ m}^2$ ab. Bezogen auf die mittlere Kronenfläche entspricht dies einer Abnahme um 3,5 % bei einer Erhöhung des Abstands um 10 m. Bei einer mittleren Kronenfläche von 88 m^2 betrug der Standardfehler 8 m^2 . Zwischen den Himmelsrichtungen bestanden Unterschiede von $1,5 \text{ m}^2 \pm 1 \text{ m}^2$, die aber nicht signifikant waren.

Die Windlast betrug im Mittel $125 \text{ kNm} \pm 14 \text{ kNm}$ (Standardfehler). Auch sie nahm linear mit dem Abstand ab, und zwar um weniger als 2 % je 10 m Abstandsänderung.

4 Diskussion

Unsere Ergebnisse zeigen einen systematischen und einen zufälligen Anteil an der Streuung der gemessenen und geschätzten Daten. Mit zunehmender Aufnahmeentfernung führte die perspektivische Verzerrung der Kronenfotos zu einer deutlichen systematischen Abnahme der Kronenfläche und damit der Windlast. Oft kann man den Aufnahmestandort nicht frei wählen. In der Regel muss man recht nah am Baum stehen, damit dieser nicht durch andere Bäume oder Gebäude verdeckt wird. Dies führt nach unseren Ergebnissen zu einer Überschätzung der Windlast und damit einer Unterschätzung der Sicherheit des Baumes. Damit liegt der Fehler zwar auf der „sicheren“ Seite der getroffenen Sicherheitsaussage, könnte aber im Einzelfall zu unnötigen Maßnahmen führen.

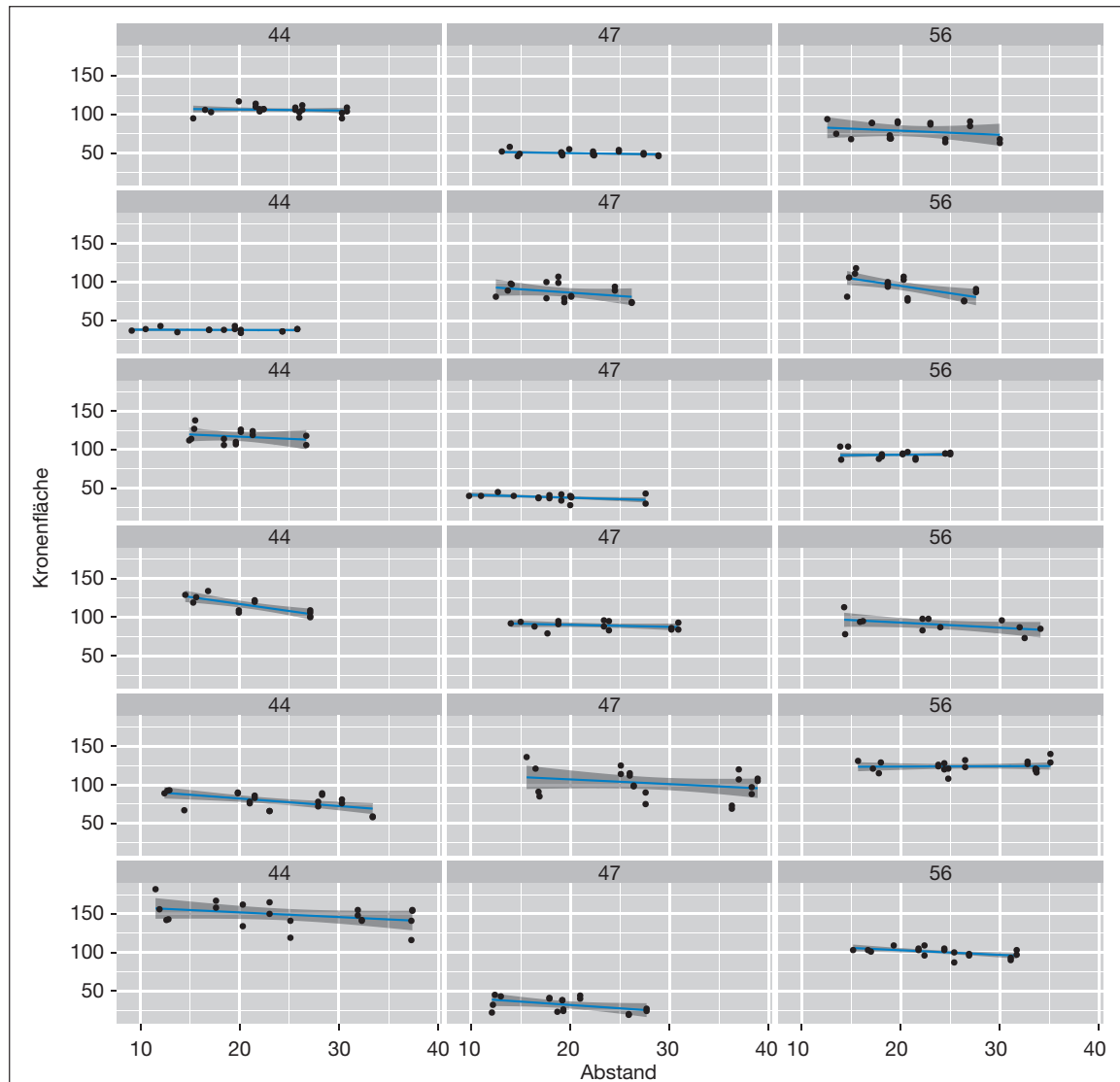


Abbildung 1: Ergebnisse der Schätzung der Windlast. Jede Teilgraphik bildet Ergebnisse für eine der Birken ab

Mit etwa 11 % des Mittelwertes war die Unsicherheit der Windlast jedoch erstaunlich gering. Der 95 %-Vertrauensbereich für die mittlere Windlast betrug in unserem Fall bei fünf Messungen je Baum ± 13 kNm. Bei nur einer Messung, dem in der Praxis eher typischen Fall, wäre er deutlich höher (± 29 kNm) und zudem unbekannt. Unberücksichtigt bleibt hier die Unsicherheit bei der Höhenmessung. Wann immer möglich sollte mindestens die Höhe mehrfach unabhängig gemessen werden. Empfehlenswert sind fünf Messungen (RUST 2014).

Weiterhin sollte der Abstand zum Baum bei der Aufnahme möglichst groß sein. Bei Bäumen mit einem Sicherheitsfaktor nahe 1,5 empfiehlt sich auch die Schätzung der Kronenfläche aus mehreren Kronenfotos. Unsere Ergebnisse zur perspektivischen Verzerrung sind auch auf andere Baumarten und Umstände übertragbar, da es sich um einen rein geometrischen Effekt handelt, der von der Baumart und -größe sowie dem Standort unabhängig ist. Seine theoretische Größe ist daher für beliebige Situationen berechenbar. Führen Fotos aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu

unterschiedlichen Windlasten, muss dies nicht unbedingt eine große Messunsicherheit bedeuten, sondern kann auch auf asymmetrischen Kronenformen beruhen.

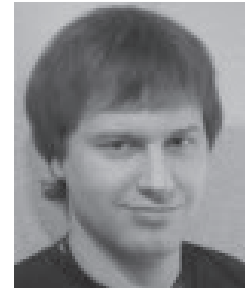
Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden vom BMBF gefördert (Förderkennzeichen 17021X11).

Literatur

- CULLEN, S., 2005: Trees and wind: a practical consideration of the drag equation velocity exponent for urban tree risk management. *Journal of Arboriculture* 31 (3), 59–63.
- DAVENPORT, A. G., 1960: Rationale for Determining Design Wind Velocities. *ASCE Journal of the Structural Division*, 39–68.
- DETTNER, A.; RUST, S., 2013: Neue wissenschaftliche Ergebnisse zu Zugversuchen. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege*, Haymarket Media, Braunschweig, 87–100.
- JACOBS, M. R., 1936: The Effect of Wind on Trees. *Australian Forestry* 1 (2), 25–32.
- MERGEN, F., 1954: Mechanical Aspects of Wind-Breakage and Wind-firmness. *Journal of Forestry* (52), 119–125.
- METZGER, C., 1893: Der Wind als maßgebender Faktor für das Wachstum der Bäume. *Mündener Forstliche Hefte*, 35–86.
- NIKLAS, K. J., 1992: *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago press.
- PRANDTL, L., 1932: Meteorologische Anwendung der Strömungslehre. *Beitr. Phys. fr. Atmos* 19, 188–202.
- RINN, F., 2005: Fehlerrechnung in der Baumkontrolle? *AFZ-Der Wald*, 1325–1328.
- RUST, S., 2014: Erhebung von Messwerten bei der Baumuntersuchung – zum Umgang mit der unvermeidbaren Unsicherheit. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege*, Haymarket Media, Braunschweig, 256–264.
- TIRÉN, L., 1928: Einige Untersuchungen über die Schaftform. *Meddelanden Fran Statens Skogsförsöksanstalt* 24 (4).
- VOGEL, S., 1989: Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds. *Journal of Experimental Botany* 40.8, 941–948.
- VOGEL, S., 1994: *Life in moving fluids: the physical biology of flow*. Princeton University Press.
- VOGEL, S., 2009: Leaves in the Lowest and Highest Winds: Temperature, Force and Shape. *The New Phytologist* 183 (1) (January), 13–26.
- YLINEN, A., 1953: Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume. *European Journal of Wood and Wood Products* 11 (6), 16–17.

Autoren



Fabian Collet und *Alexander Vögeli* sind Studierende der Arboristik an der HAWK.

Catherina Rust war wissenschaftliche Mitarbeiterin an der HAWK.



Andreas Dettner ist Diplom-Ingenieur der Landespflege, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger und Mitinhaber des Sachverständigenbüros *Brudi & Partner TreeConsult* in Gauting.

Dipl.-Ing. Andreas Dettner
ö.b.v. Sachverständiger
Brudi & Partner
TreeConsult
Berengariastraße 7
82131 Gauting
Tel. (0 89) 75 21 50
a.dettner@tree-consult.org



Prof. Dr. Steffen Rust ist Professor für Baumpflege und Baumbiologie an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Göttingen.

Fakultät
Ressourcenmanagement
HAWK
Büsgenweg 1a
37077 Göttingen
Tel. (05 51) 50 32-1 73
rust@hawk-bhg.de

