

# Zum Zusammenhang zwischen Schlankheitsgrad und Bruchversagen

On slenderness and tree failure

von *Sascha Jillich, Jürgen Köhler, Steffen Rust, Catherina Rust und Andreas Detter*

## Zusammenfassung

Die Versagensrate von nicht fäulegeschädigten Bäumen in der Stadt soll rapide mit ihrem Schlankheitsgrad ansteigen. Diese Hypothese wurde mit Erhebungen an Waldbäumen begründet. Wir haben unterschiedlich schlanke Fichten im Wald bis zum Versagen belastet. Unsere Ergebnisse zeigen, dass der Schlankheitsgrad keinen bedeutenden Einfluss auf die Belastbarkeit dieser Bäume hat. Aussagen über die Verkehrssicherheit von Bäumen in der Stadt sollten daher nicht weiter auf die Überschreitung eines Grenzwertes von  $H/D = 50$  gestützt werden.

## Summary

A slenderness coefficient of 50 has been proposed as a failure criterion for non-decayed solitary urban trees. This hypothesis is based on guidelines from forestry. We subjected forest trees covering a range of slenderness to destructive pulling tests. Our results show that the effect of slenderness on maximum bending moments is negligible. Therefore, the assessment of urban trees should not be based on a slenderness coefficient of 50.

## 1 Einleitung

Der Schlankheitsgrad ist in der Forstwirtschaft traditionell ein wichtiger Indikator für die Stabilität von Wäldern. Empirisch belegt ist, dass schlanke, junge Nadelwälder in der Nassschneezone anfälliger für Schnee- und Eisbruch sind. Die Ergebnisse zur Windwurf- und Windbruchgefährdung sind jedoch widersprüchlich. Während Modellrechnungen zufolge schlanke Fichten eher brechen als gedrungene (PETTY & SWAIN 1985), zeigen Feldstudien, dass schlanke ähnlich oder sogar weniger anfällig sind (VALINGER & FRIDMAN 1997; MÜLLER 2002; NISHIMURA 2005; SCHÜTZ et al. 2006; ALBRECHT et al. 2010). Vor einigen Jahren wurde vorgeschlagen, einen Schlankheitsgrad von 50 als ein Versagenskriterium für defektfreie solitäre Bäume einzuführen (MATTHECK et al. 2001). Ziel dieser Untersuchung ist der experimentelle Vergleich der Stabilität unterschiedlich schlanker Fichten durch quasi-statische Zugversuche bis zum Versagen.

## 2 Material und Methoden

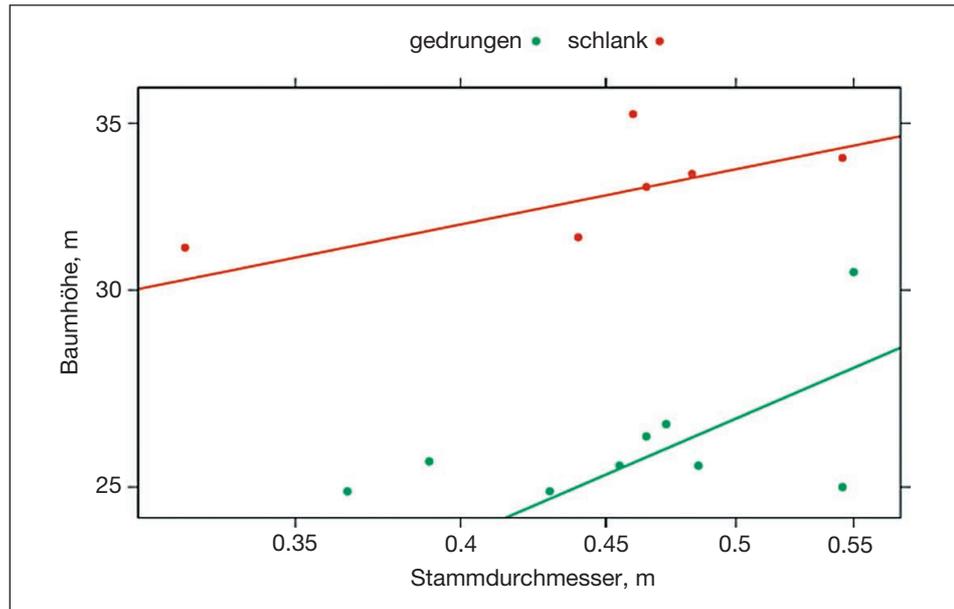
### 2.1 Bäume

Verwendet wurden 15 Fichten (*Picea abies*) mit Stammdurchmessern von 32 cm bis 57 cm, Baumhöhen von 25 m bis 35 m und Schlankheitsgraden zwischen 45 und 98 in zwei benachbarten Abteilungen des Forstamtes Heilbronn. Die Bäume des schlanken Bestandes waren bei etwa gleichen Durchmessern deutlich höher (Abbildung 1).

### 2.2 Schallgeschwindigkeitsmessungen

Die axiale Schallgeschwindigkeit wurde mit einem Schalltomographen (PICUS, argus electronic, Rostock) auf 12 Strecken im Bereich von 1 m bis 2 m sowie auf einer Strecke von 0,5 m bis 4,5 m gemessen.

**Abbildung 1:**  
Baumhöhe und  
Stammdurchmesser  
der Probebäume,  
Linien: reduzierte  
Hauptachsenregression



### 2.3 Darrdichte

Zwischen den Endpunkten der Schallgeschwindigkeitsmessungen wurden mit dem Zuwachsbohrer 2 cm lange Proben genommen, bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen.

### 2.4 Zugversuche

Die Fichten wurden entastet und gekappt, um Fehler, die durch das Eigengewicht der Krone und des Stammes entstehen, zu minimieren. Bei einer Anbindung in etwa 80 Prozent der Baumhöhe wurden sie mit einer Winde bis zum Versagen belastet. Dehnungsmessgeräte wurden in 1 m, 2 m, 3 m und 4 m Höhe über dem Erdboden angebracht, Neigungsmessgeräte direkt über dem Boden und in 5 m Höhe (System Tree-Qinetic, argus electronic GmbH, Rostock).

### 2.5 Statistische Auswertung

Die Analyse erfolgte mit generalisierten gemischten Modellen mit Anpassungen für Heteroskedastizität sowie reduzierten Hauptachsenregressionen. Die Modellanpassung und Variablenselektion bei nicht orthogonalen Unabhängigen wurde mit shrinkage-Methoden ausgeführt.

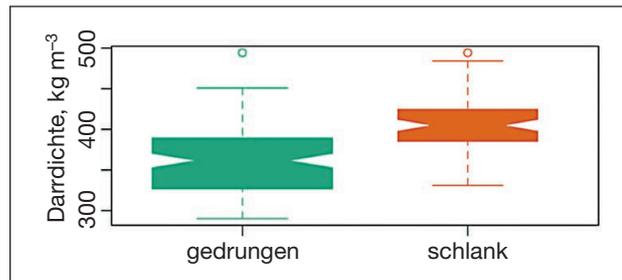
## 3 Ergebnisse

### 3.1 Holzdichte

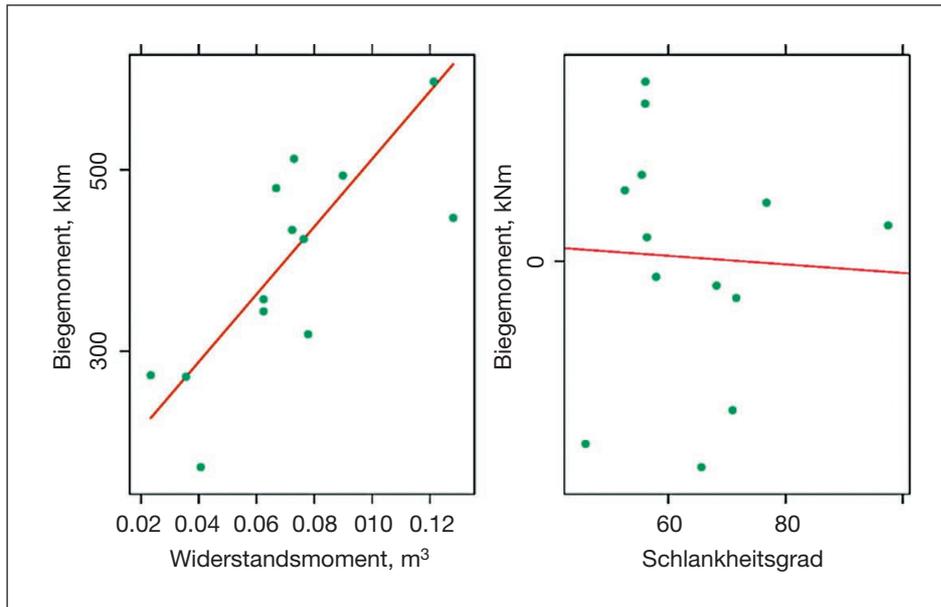
Die mittlere Darrdichte im Bereich von 1 m bis 4 m betrug im schlanken Bestand 405 kg m<sup>-3</sup> und im gedrungenen Bestand 356 kg m<sup>-3</sup> (Abbildung 2). Die Dichte stieg höchst signifikant ( $p \leq 0,01$ ) mit der Höhe im Stamm an.

### 3.2 Axiale Schallgeschwindigkeiten

Die mittlere axiale Schallgeschwindigkeit von 1 m bis 2 m betrug im schlanken Bestand 2815 ms<sup>-1</sup> und im gedrungenen Bestand 2509 ms<sup>-1</sup>. Der Unterschied ist hoch signifikant ( $p \leq 0,0012$ ). Die mittlere axiale Schallgeschwindigkeit von 1 m bis 4,5 m betrug im



**Abbildung 2:** Darrdichte der äußeren 2 cm der Probebäume der beiden Bestände



**Abbildung 3:**  
Einflüsse auf die Biegemomente beim Bruch, rechts: Zusammenhang zwischen den normierten Residuen aus dem Modell links und dem Schlankheitsgrad

schlanken Bestand  $2722 \text{ ms}^{-1}$  und im gedrungenen Bestand  $2144 \text{ ms}^{-1}$ . Der Unterschied ist hoch signifikant ( $p \leq 0,0071$ ). Im gedrungenen Bestand stiegen die Schallgeschwindigkeiten nach oben an, während sie im schlanken Bestand konstant waren.

### 3.3 Elastizitätsmodul

Weder der Elastizitätsmodul  $E$  noch die Biegesteifigkeit (das Produkt aus  $E$  und dem Flächenmoment 2. Grades  $I$ ) unterschieden sich signifikant zwischen den Beständen.

### 3.4 Bruchversagen

Alle Bäume brachen (Sekundärversagen), wären aber bei nur geringer weiterer Lasterhöhung auch gekippt. Die maximalen Biegemomente beim Bruch hingen im Wesentlichen vom Widerstandsmoment des Stammes in 1 m Höhe ab. Der Schlankheitsgrad hatte einen sehr geringen Einfluss: Eine Erhöhung des Schlankheitsgrades von 50 auf 100 verminderte das maximale Biegemoment um knapp 8 Prozent (Abbildung 3).

### 3.5 Verankerung

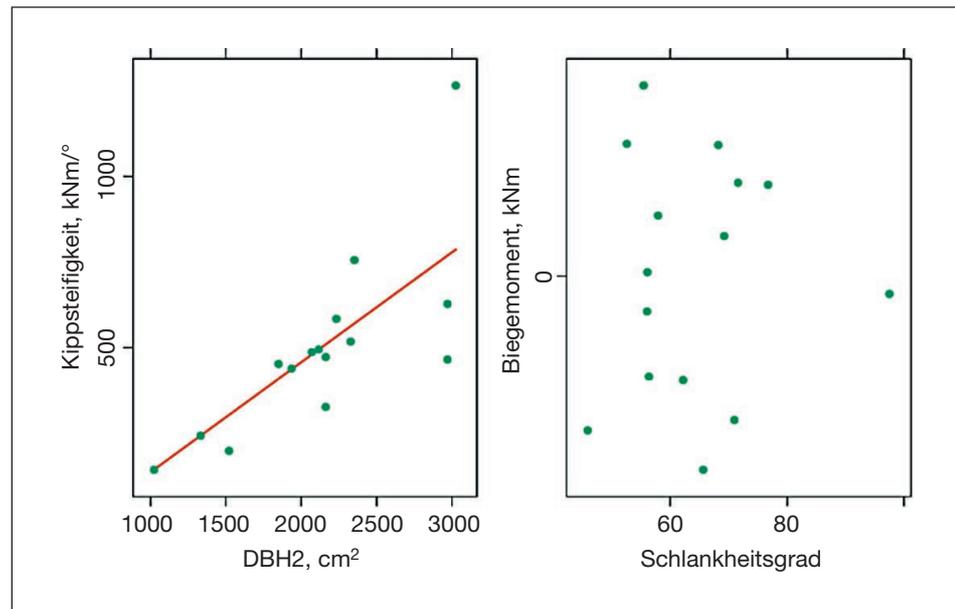
Die Verankerung im Boden wurde durch das zur Neigung der Stammbasis auf  $0,25^\circ$  erforderliche Biegemoment quantifiziert (JONSSON et al. 2006; NEILD & WOOD 1999). Sie hing vom Stammquerschnitt ab, gemessen als Quadrat des Stammdurchmessers in 1 m Höhe. Der Schlankheitsgrad hatte keinen Einfluss (Abbildung 4).

## 4 Diskussion

Von entscheidender Bedeutung für die Bruchfestigkeit der Bäume war ihr Querschnitt, nicht ihre Form. Das Flächenträgheitsmoment in 1 m Höhe bestimmte zum größten Teil das maximale Biegemoment beim Bruch. Die verbleibende Streuung wurde zu einem geringen Teil vom Schlankheitsgrad beeinflusst.

Bäume sind keine Balken mit immer und überall gleichen Materialeigenschaften. Die Festigkeit des Holzes wird von Faktoren wie Dichte, Winkel der Mikrofibrillen, Anteil des juvenilen Holzes, Faserlängen, Anteil des Druckholzes und Vorkommen von Ästen bestimmt. Alle diese Holzeigenschaften können von den Bäumen zur Anpassung an ihre individuelle Lastsituation variiert werden. So hatten die schlankeren Bäume dichteres Holz mit höheren Schallgeschwin-

**Abbildung 4:**  
Zusammenhang zwischen der Kippsteifigkeit und dem Stammquerschnitt, ausgedrückt als Stammdurchmesser, rechts: Zusammenhang zwischen den normierten Residuen aus dem Modell links und dem Schlankheitsgrad



digkeiten in den Randfasern. Dichteres Holz hat meist eine höhere Bruchfestigkeit (z. B. ROSNER et al. 2007; STEFFENREM et al. 2007).

Die Aussagen in der maßgeblichen und oft zitierten Arbeit von PETTY und SWAIN (1985) wurden unter zwei offensichtlich unrealistischen Annahmen erzielt: Die Holzeigenschaften schlanker und gedrungener Bäume seien identisch und ihre Kronen seien gleich groß. Geht man jedoch davon aus, dass die Kronen schlanker Bäume deutlich kleiner sind als bei gedrungenen, so zeigen auch die Berechnungen von PETTY und SWAIN (1985), dass beide bei etwa gleicher kritischer Windgeschwindigkeit brechen. Hinzu kommt noch das vermutlich festere Holz der schlanken Bäume. Es verwundert daher nicht, dass unsere experimentellen Beobachtungen zum gleichen Ergebnis kommen wie die zahlreichen eingangs zitierten Feldstudien, nämlich dass schlanke Bäume nicht leichter versagen als gedrungene.

MATTHECK et al. (2001) haben die Vorstellung versagensgefährdeter schlanker Bäume aus dem Wald auf Stadtbäume übertragen. Unsere Ergebnisse zeigen aber, dass in dem für die Baumkontrolle wesentlichen Bereich des Schlankheitsgrades schlanke Waldbäume ebenso belastbar sind wie gleich dicke, gedrungene. Zwar kann der Schlankheitsgrad die Eigenfrequenz und Dämpfung von Bäumen beeinflussen (RUST et al.

2013), für Stadtbäume spielen im Gegensatz zu Waldbäumen die potentiell lasterhöhenden Resonanzeffekte aufgrund der Kronenarchitektur jedoch kaum eine Rolle (JAMES et al. 2006; SPATZ et al. 2007). Der Schlankheitsgrad 50 ist daher ungeeignet zur Unterscheidung zwischen gefährlichen und ungefährlichen Stadtbäumen.

### Literatur

- ALBRECHT, A.; HANWINKEL, M.; BAUHS, J.; KOHNLE, U., 2010: How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. In: European Journal of Forest Research 131.1, 229–247.
- JAMES, K.; HARITOS, N.; ADES, P. A., 2006: Mechanical stability of trees under dynamic loads. American Journal of Botany 93 (10), 1522–1530.
- JONSSON, M. J.; FOETZKI, A.; KALBERER, M.; LUNDSTRÖM, T.; AMMANN, W.; STÖCKLI, V., 2006: Root-soil rotation stiffness of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growing on subalpine forested slopes. In: Plant and Soil 285.1-2, 267–277.
- MATTHECK, C.; BETHGE, K.; TESARI, I.; KAPPEL, R., 2001: Ein neues Versagenskriterium für nicht fäulegeschädigte solitäre Bäume. In: Wissenschaftliche Berichte FZKA 6666.
- MÜLLER, F., 2002: Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäulerisiko in Fichtenbeständen auf Einzelbaumebene. Diss. TU München.
- NEILD, S. A.; WOOD, C. J., 1999: Estimating stem and root-anchorage flexibility in trees. In: Tree physiology 19.3, 141.
- NISHIMURA, T. B., 2005: Tree characteristics related to stem breakage of *Picea glehnii* and *Abies sachalinensis*. In: Forest Ecology and Management 215.1–3, 295–306.

- PETTY, J. A.; SWAIN, C., 1985: Factors Influencing Stem Breakage of Conifers in High Winds. In: *Forestry* 58.1, 75–84.
- ROSNER, S.; KLEIN, A.; MULLER, U.; KARLSSON, B., 2007: Hydraulic and mechanical properties of young Norway spruce clones related to growth and wood structure. In: *Tree Physiol* 27.8, 1165–1178.
- RUST, S.; BRAUN, G.; MAURER, L.; DETTER, A., 2013: Verändern Kronensicherungen das Schwingungsverhalten von Bäumen?. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege*, Haymarket Media, Braunschweig, 292–295.
- SCHÜTZ, J.-P.; GÖTZ, M.; SCHMID, W.; MANDALLAZ, D., 2006: Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. In: *European Journal of Forest Research* 125.3, 291–302.
- SPATZ, H., 2007: Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations?. In: *American Journal of Botany* 94.10, 1603–1611.
- STEFFENREM, A.; SARANPÄÄ, P.; LUNDQVIST, S.-O.; SKRÖPPA, T., 2007: Variation in wood properties among five full-sib families of Norway spruce (*Picea abies*). In: *Ann. For. Sci.* 64.8, 799–806.
- VALINGER, E.; FRIDMAN, J., 1997: Modelling probability of snow and wind damage in Scots Pine stands using tree characteristics. In: *Forest Ecology and Management* 97, 215–222.

### Autoren

*Jürgen Köhler* arbeitet seit 2000 als selbständiger Gärtnermeister in Würzburg und studiert derzeit an der HAWK in Göttingen Arboristik.

*Jürgen Köhler*  
Oberer Burgweg 9  
97082 Würzburg  
Tel. (09 31) 8 09 83 81  
gartenverzauberung  
@t-online.de



*Sascha Jillich*, Forstwirt und Fachagrarwirt für Baumpflege und Baumsanierung studiert derzeit an der HAWK in Göttingen Arboristik.

*Sascha Jillich*  
Heimstättenweg 20  
74831 Gundelsheim  
Tel. (01 62) 9 79 41 45  
sascha@wuestenzeit.de



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

*Dipl.-Forstingenieurin (FH) Catherina Rust* arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der HAWK im Forschungsprojekt „Zerstörungsfreie Analyse der Verkehrssicherheit von Bäumen in der Stadt“.



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

*Andreas Detter* ist Dipl.-Ing. der Landespflege und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger. Er ist Mitglied des Vorstands der Sachverständigen-Arbeitsgemeinschaft SAG Baumstatik e.V. und im Büro Brudi & Partner TreeConsult in Gauting bei München als Sachverständiger und Referent tätig.

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

