

Bambus und seine mechanischen Eigenschaften

Einführung



Bambusarten

Der Bambus ist in Größe, Leichtigkeit und Festigkeit ein extremes Produkt der Natur. Er ist stabil und dank seiner Hohlräume ein extrem leichter und elastischer Baustoff. Durch Trennwände versteift und durch seine physikalischen Eigenschaften ist er anderen Baustoffen weit überlegen.



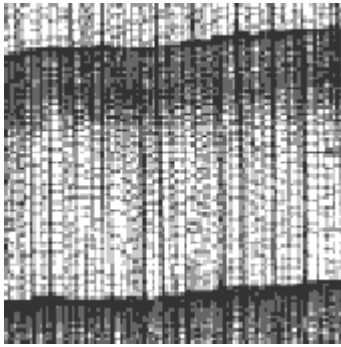
guadua angustifolia

Weltweit gibt es etwa 500 verschiedene Bambusfamilien mit teilweise hunderten von Unterarten. In Kolumbien allein werden etwa 25 verschiedene Riesenbambusse verwendet. Zu diesen gehört auch der von uns betrachtete "guadua angustifolia". Er wächst bis 1800 m NN meist in kleinen Wäldchen entlang der Bäche, aber auch auf Wiesen oder in Hanglagen. Es gibt zwei Unterarten namens *guadua castilla* und *guadua mecana*. Er erreicht eine Höhe von etwa 20-25m und einen Durchmesser bis zu 18cm.



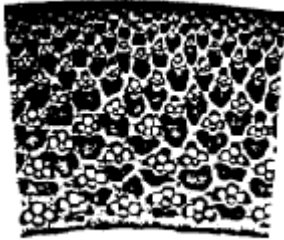
Bambuswurzel

Jeder Stengel wächst aus einem netzartigen Wurzelsystem heraus und erreicht nach einem Jahr bereits seine volle Höhe. Dann beginnen die Leitgefäße zu verholzen und in den nächsten 6 - 8 Jahren gewinnt er durch die Verkieselung der äußeren Rohrwände an Härte und Festigkeit. Bambus kann auch als ein verholzendes Riesengras bezeichnet werden.



Nadelholzfasern

Der lignifizierende Zellaufbau des Bambusgewebes und seine technischen Eigenschaften sind dem eigentlichen Holzgewebe sehr ähnlich. Während Holz jedoch einen harten Kern hat (Kernholz) und nach außen hin weicher wird (Splintholz), ist der Bambus außen hart und innen weich, was einen viel stabileren Aufbau zur Folge hat. Von Innen nach Außen ist eine kontinuierliche Häufung der Leitbündel zu sehen. Die reißfesteren Faserstränge liegen dort am dichtesten, wo die statische Beanspruchung am größten ist.



Bambusfasernfasern

Bambus im Test



Materialprüfung

Um die Materialeigenschaften von Bambus zu bestimmen und untereinander zu vergleichen spielt die Herkunft, das Alter, der Feuchtigkeitsgehalt und natürlich der Rohrdurchmesser eine große Rolle. Vergleicht man die verschiedenen Untersuchungsergebnisse zu den Festigkeitseigenschaften des Bambus, so erkennt man die große Streuung der Ergebnisse, obwohl alle den gleichen Bambus (*guadua angustifolia*) geprüft haben.

Materialkennwerte

Materialkennwerte	Bambus	Diese Daten lieferte das Stuttgarter Institut FMFA zur Untersuchung des Zeri-Pavillions. Leider lässt sich aus den Angaben, die in der Zeitschrift "Bautechnik 77,2000, Heft 6/7" veröffentlicht wurden, keine genauen Materialdaten sowie Prüfungsbedingungen beschreiben. Lediglich wird erwähnt, daß die Stäbe der Art " <i>guadua angustifolia</i> " einen Durchmesser von 10 bis 14 cm und einer Wanddicke von 15 bis 20 mm haben sollten, die angelieferten Stäbe aus Kolumbien jedoch stark variierten. Daher wurde eine Vorsortierung
kN/cm ²		
E-Modul	1900	
Knicken (Druck Faser)		
betaD mit Lambda=10	5,6	
betaD mit Lambda=56	3,9	
betaD mit Lambda=86	2,7	
betaB Biegung	7.4	

betaT Schub	0,43
betaZ Zug II Faser	>=9,5

ähnlich der bei Holz notwendig und es wurden aus jeder Lieferung mindestens 3 Stäbe geprüft. Genauere Angaben z.B. zur Länge fehlen jedoch.

Vergleichstabelle aus DB9/97

kN/cm ²	Fichte	Bambus	St37
E-Modul	1100	2000	21000
Druckfestigkeit	4,3	6,2-9,3	14
Zugfestigkeit	8,9	14,8-38,4	16
Biegefestigkeit	6,8	7,6-27,6	14
Scherfestigkeit	0,7	2,0	9,2

Bei den Biege- bzw. Schub- und Zugversuchen wurde die Bruchgrenze ermittelt; nicht zu verwechseln mit der zul. Grenzspannung. Auch deshalb ist ein Vergleich mit den üblichen Baumaterialien schwierig. Dennoch ein Versuch.

Diese Tabelle stammt aus der DB9/97.

Druckfestigkeit

Druckfestigkeit Rohr	Rohr
kN/cm ²	d=60mm d=32mm
parallel z. Faser	6,36 8,63
senkrecht z. Faser	5,25-9,3

Dünnere Rohre haben im Verhältnis zu ihrem Querschnitt eine höhere Druckfestigkeit parallel wie auch senkrecht zur Faser gegenüber dickeren Rohren. Das verhältnismäßig dünnere Rohre bessere Materialeigenschaften aufweisen, hängt im wesentlichen damit zusammen, daß bei dickeren Rohren der Anteil der zugfesteren Außenhaut geringer ist. Die unbegrenzte Längsspaltbarkeit der Bambusrohrwand in den Internodien ist durch die streng parallel gerichteten Fasern bedingt; in den Nodien aber durchkreuzen sie sich nach allen Richtungen. Diese Verstärkungsknoten mit stark verkieselten Diaphragmen erhöhen die Spaltfestigkeit und die Knickfestigkeit des Rohres. Außerdem wissen wir, daß ein zylindrisches Rohr, verglichen mit einem vollen Rundstab eine vielfache Biegesteifigkeit hat.

Der Ligninanteil bestimmt die Druckfestigkeit. Der hohe Zelluloseanteil dagegen bestimmt die Knick- und Zugfestigkeit, da er die Gerüstsubstanz darstellt.

Zugfestigkeit

Zugfestigkeit	Rohr	Rohr
kN/cm ²	d=80mm	d=30mm
äußere Faserschicht	min=30,68 max=32,73	min=35,74 max=38,43
innere Faserschicht	min=13,53 max=16,33	min=14,84 max=19,47
ganze Wanddicke	min=16,27 max=21,51	min=23,25 max=27,58

Bambus kann wesentlich mehr Zug als Druck aufnehmen. Schlankere Rohre sind auch hier wieder überlegen. In der verkieselten äußersten Randschicht laufen axialparallel hochelastische Fasern mit einer Zugfestigkeit von teilweise bis zu 40 kN/cm². Zum Vergleich: Extrem starke Holzfasern können nur bis zu 5 kN/cm² Zug aufnehmen und ST37 Stahl im Extremfall (Bruchspannung!) 37kN/cm². Die hervorragenden Eigenschaften der Zugfestigkeit des Bambus macht man sich heute auch in der Materialforschung zu Nutze. Die hochfesten Bambusfasern können bei armierten Materialien (z.B. Stahlbeton) als Bewehrung eingesetzt werden. Dadurch werden extrem dünnwandige Leichtbaukonstruktionen möglich.

Elastizitätsmodul

E-Modul auf Druck	kN/cm ²		
mm	d=100	d=80	d=70
min	1519	1890	1650

Auch beim E-Modul macht sich der Vorteil der schlankeren Stäbe in bezug auf ihre Querschnittsfläche bemerkbar. Die Häufung der hochfesten Faserstränge in der Wandaußenzone wirken bei der Elastizität ebenso festigend wie bei der Zug-, Scher- und Biegebeanspruchung. Es gibt ein optimales Rohrquerschnittsverhältnis, wird dieses über- bzw. unterschritten fällt der E-Modul wieder. (je größer der E-Modul desto hochwertiger der Bambus). Wie auch bei Massivholz reduziert sich der E-Modul mit wachsender Beanspruchung (5-10%). Die durchaus große Elastizität macht Bambus besonders als Baumaterial in erdbebengefährdeten Gebieten sehr nützlich. Auch werden Baugerüste heute in Asien noch aus Bambus hergestellt.

E-Modul auf Zug	kN/cm ²		
mm	d=90	d=80	d=70
min	1700	1790	1400
max	2200	2410	?





Bambusgerüst

E-Modul auf Biegung kN/cm ²	mm	d=100	d=70	d=30
Stabaußenfaser zugseitig		1690	2270	3250
Stabinnenfaser zugseitig		1360	1890	-
kompl. Rohrdurchmesser		1700-	2200	

Biegefestigkeit

Biegefestigkeit kN/cm ²	mm	d=100	d=80	d=70
min		1,519	1,890	1,650

Atrops untersuchte für Baustoffe übliche Bambusmaterialien: Rohrdurchmesser 70-100 mm, Wanddicken 6-12 mm bei Stützweiten von 3,60m . Die elastische Durchbiegungen waren $\min = 1/25,9$ und $\max 1/16,1$ und im Mittel $1/20,1$ der Stützweiten. Dort, wo in der Konstruktion eine Durchbiegung unvermeidbar ist und störend wirkt, können die frisch geschlagenen Rohre erstmal einer Vorbiegung (Überhöhung) unterzogen werden., die sich Später unter der Nutzlast wieder ausgleicht.

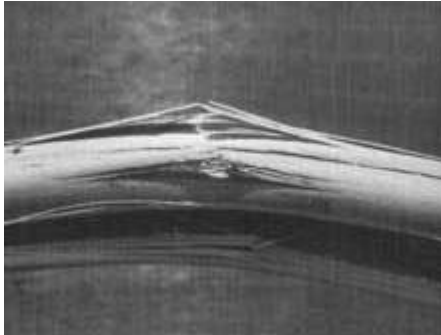
Scherfestigkeit

Scherfestigkeit kN/cm ²	Stab	Rohr
	min=1,69 max=2,31 mittel=1,98	min=1,47 max=2,22 mittel=1,67

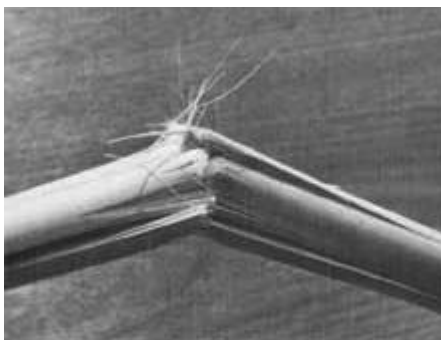
Vor allem für die Gestaltung der Bambusrohrverbindungen ist die Berücksichtigung des Scherwiderstandes wichtig. Die Angaben unter "Stab" betreffen Probekörper als Rohrwandstreifen Zweischnittig, unter "Rohr" betreffend ganze Rohrabschnitte vierschnittig. Der Einfluss des Scherflächenabstandes nimmt bei wachsender Scherflächenlänge ab. Bei 10mm Wandstärke ist die Scherfestigkeit etwa 11% geringer als bei 6mm Wandstärke; bedingt durch die Verteilung der hochfesten Faseranteile pro Querschnittsfläche. Die Tabellenwerte stammen

von Internodienmaterial. Die Werte für Nodienmaterial liegen etwa um 50% höher.

Bruchverhalten



Bruchverhalten



Bruchverhalten

Das Bruchverhalten des herkömmlichen Bauholzes unterscheidet sich vom Bruchverhalten des Bambus. Hier erfolgt beim Reißen einzelner Fasern kein spontaner Bruch durch das ganze Material (Rohr). Die auftretenden Risse werden sofort in Faserrichtung abgelenkt und beeinträchtigen damit weniger die festigkeitsgefährdete Stelle. Der Energiezufluß ist durch Zerstreuung verzögert. Die entstehenden Längsrisse werden an ihrer Ausbreitung über die gesamte Rohrlänge durch die Verstärkungsknoten (Nodien, Diaphragmen) gehindert. Besonders die Druck-, Scher- und Spaltfestigkeit wird durch das Knotenmaterial erhöht. Derartige Symptome werden als Steigerungsfaktoren der Bruchzähigkeit bezeichnet. In der Forschung bei modernen Verbundwerkstoffen versucht man auch weniger die Rissebildung zu unterbinden, als vielmehr einer Risseausbreitung durch geeigneten Materialaufbau entgegenzuwirken. Nach Cooper wird die Brucharbeit vom Verhältnis der Faserfestigkeit zur zur Matrixfestigkeit sowie der Bindefestigkeit zwischen Fasern und Matrix maßgebend beeinflusst. Dabei muß eine Verbesserung der Bruchzähigkeit meistens mit einer Verminderung der Festigkeit quer zu den Fasern erkauft werden (Totalspaltung, unbegrenzte Längsspaltbarkeit von Internodien).

Schlagbruchverhalten



Die zum Durchschlagen eines Bambusrohres verbrauchte Arbeit $A:f$ (mkp/cm²) bleibt nahezu gleich, ob der Schlag den Knoten oder den Schaft trifft. Die Brucherscheinung selbst ist jedoch ganz verschieden. Beim Schlag auf den Knoten zerspringt das Rohr in axiale Streifen; Bruch infolge Überwindung der Festigkeit in Faserquerrichtung. Beim Schlag auf das Internodium erfolgt das eigentliche Abbrechen; Bruch infolge Überwindung der Zugfestigkeit der Faserlängsrichtung. Die Werte der Bruchschlagarbeit ($D=30$ mm; $d=4$ mm) liegen

 Bruchverhalten

bei 2,65 mkp/cm². Da es sich hier um einen Rohrkörper handelt, wird damit mehr die Gestaltfestigkeit benannt und kann deshalb mit dem Wert von Fichte (0,5 mkp/cm²) nicht direkt verglichen werden.

Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Dr. Simon Aicher, Otto- Graf-Institut

Druckfestigkeit	5,6kN/cm ²
Druckfestigkeit E-Modul	1840 kN/cm ²
mittlere Biegefestigkeit	7,4 kN/cm ²
mittlere Biegefestigkeit bei idealer Trocknung	10 kN/cm ²
mittleres Biege-E-Modul	1790kN/cm ²
mittleres Zug-E-Modul	1900 kN/cm ²

Untersuchungen zur Tragfähigkeit der Bambusart Guadua Angustifolia von Dr. Simon Aicher, Otto- Graf-Institut Hier waren die Voraussetzungen, daß die Rohre eine Querschnittsschlankheit von $3 < r/t < 5,5$ hatten, eine nicht klimatisierte Prüfhalle und einen Feuchtigkeitsgehalt von 10-15% des Bambus. Hier einige Ergebnisse:

Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Oskar Hidalgo Lopez

32 Testergebnisse

Elastizitätsmodul 65 Proben	1350	2770	2150
Längsdruck parallel 76 Proben	ohne Knoten 2,26	7,05	3,93
	mit Knoten 2,62	6,36	
Zugbelastung parallel 163 Proben	ohne Knoten ?	32,13	19,19
	mit Knoten 12,17	20,68	
Spaltbarkeit 27 Proben	0,45	1,44	0,93

Belastbarkeitstest von guadua angustifolia an der Universität Valle, Cali mit CIBAM in Palmira, Kolumbien durchgeführt unter der Leitung von Architekt Oskar Hidalgo Lopez, damals auch an der Universidad National Bogota, sowie Ing. Jose Villar y Ing. Patricia Imery. Die Vorgehensweise orientiert sich an der Veröffentlichung von Motoi Otta: 'Studies on the properties of Bamboo Stem'.

§ 13 Exemplare zwischen 9 und 13 cm Durchmesser und 17 bis 23 Metern Länge
 § gewachsen auf etwa 1000 m NN (Gegen alle Erwartungen und früherer 'Forschungen' nahm die relative Druckfestigkeit mit der Höhe über Grund geringfügig zu)
 § mittlerer Wanddurchmesser unten von 22 und auf halber Höhe von etwa 10 mm
 § Alter zwischen 9 Monaten und 7 Jahren (was im

wesentlichen den großen Unterschied der Daten erklärt) (Druckfestigkeit nahm meist mit dem Alter zu. Auf Druck hielten Einjährige $2,61 \text{ kN/cm}^2$ und 6-jährige $7,05 \text{ kN/cm}^2$ aus. Auf Zug gab es aber Verwunderung bei einem Einjährigen mit $32,06 \text{ kN/cm}^2$. Die Zugfestigkeit nahm bei 5-6 Jährigen deutlich ab)

§ Proben aus vier festgelegten Höhen (dunkle äußere Zone mit dichtgedrängten Fasern von etwa 30% mit einer Zugfestigkeit von $20,52 \text{ kN/cm}^2$ und eine weiße, innere, porige Zone von 70% mit einer Zugfestigkeit von nur $7,06 \text{ kN/cm}^2$; im Knotenbereich ist die Faseraufteilung dagegen durchwachsen und ergibt einen Mittelwert von $11,75 \text{ kN/cm}^2$)

§ Veränderungen der Dimensionen bei der Befeuchtung über den Fasersättigungspunkt, zum Beispiel beim Kontakt mit frischem Mörtel, führen insbesondere bei weichen, jungen Fasern zu reichlich Wasseraufnahme. Älterer Bambus dagegen variiert erheblich weniger.

Ergebnis

Wie unschwer zu erkennen ist, variieren die Prüfungsergebnisse stark. Ob ein direkter Vergleich möglich ist, ist fraglich. Besonders weil die Prüfungsbedingungen oft unklar sind. estzuhalten ist, daß alle Prüfergebnisse von den Kolumbianischen übertroffen werden, CIBAM in Zusammenarbeit mit der Universidad del Valle, Cali (1000 m über NN) hat ein Elastizitätsmodul von 2.130 kN/cm^2 erarbeitet, andere



bamboo forest

Proben in Medellin (1800 m) und der Kaffeeregion 1400-1700 m NN weisen noch höhere Werte auf. Auch die Untersuchungen zu den Druck- und Zugfestigkeiten haben Differenzen. Hier wird bei einigen Prüfungen unterschieden, ob Rohrabschnitte mit oder ohne Nodien geprüft wurden oder zwischen der Dicke der Rohre. Außer der Meereshöhe hat das Alter der Stangen einen großen Einfluß auf die Verkieselung der Gefäße und führt zu erheblicher Zunahme der Druckfestigkeit. Die Lage der an den Baustellen verwendeten Bambussektion im Bezug auf die Gesamthöhe einer Guaduastrange, hat großen Einfluß auf Wandstärke und Reißfreiheit, ebenso die Bodenbeschaffenheit und die Feuchtigkeit des Bodens.

Vergleich der Untersuchungsergebnisse

kN/cm ²	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	E-Modul	Biegefestigkeit
DB-Zeitung	14,8-38,4	6,2-9,3	2000	7,6-27,6
Dr.S.Eicher	-	5,6	1840	7,4-10
Dr.H.Lopez	19,19	3,93	2150	-
Prof.Janssen	-	-	1760	14,48

Um einen Eindruck zu bekommen, wie unterschiedlich die verschiedenen Prüfungsergebnisse sind und um eine Entscheidung zu treffen, ob sie vergleichbar sind oder nicht, hier nochmal eine Tabelle mit den wichtigsten Ergebnissen der verschiedenen Institute und Prüfungen.

Ungefähre Richtwerte von Bambus 'guadua angustifolia

	kN/cm ²	Will man trotzdem ungefähre Richtwerte angeben, so sollte man sich sicherheitshalber an die niedrigeren Festigkeitswerte halten um in jedem Fall auf der sicheren Seite zu sein. Selbst dann garantiert der Bambus noch eine optimale Ausnutzung dieses außergewöhnlichen Baumaterials.
E-Modul	1800	
Zug		
Druck	3,9	
Biegung	7,6	
Schub	0,9	
d=12cm; d=9cm	A=50cm ²	
	W=100cm ³	
	I = 700 cm ⁴	

Literaturliste

Arce-Villalobos, Oscar Antonio, -Eindhoven, Faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven: Fundamentals of the Design of Bamboo Structures, Thesis Eindhoven. -Met index .ref. ISBN 90-6814-524-X

Atrops, J. L.: Elastizität und Festigkeit von Bambusrohren. Der Bauingenieur 44 (1969), Heft 6

Janssen, J.A.: Bamboo in Building Structures, Dissertatie Drukkerij Wibro, Helmond, 19.Mai 1981

Janssen, J.A.: Bamboo research at the Eindhoven University of Technology, Eindhoven 1990

Lindemann, Josef; Steffens, Klaus: Der bambus-Pavillion zur EXPO 2000 in Hannover, Bautechnik 77 (2000), Heft 6+7, Verlag Ernst & Sohn

Mitteilungen des Institus für leichte Flächentragwerke IL Nr. 31 (1996), 3. Unveränd. Aufl., Karl Krämer Verlag Stuttgart.

NN: Grow your own House, Verlag Vitra Design Museum, Weil a. Rhein 2000, ISBN 3-931936-25-2.

Roland, Klaus, Dipl.-Ing. Päd., u.a.: Wissensspeicher Holztechnik: Grundlagen, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1988, 2. Aufl., 1988, S. 43 - 45; Dunkelberg, Klaus, "Bambus als Baustoff", in: Mitteilungen des Institus für leichte Flächentragwerke IL Nr. 31 (1992), 2. Unveränd. Aufl., Karl Krämer Verlag Stuttgart.

Stamm, Jörg: Guadua im Kontext, Brief an Prof. Wilfried Führer, Lehrstuhl für Baukonstruktion II (Tragwerklehre), RWTH Aachen.

Url