

## Referat 08.01.2001 'Bamboo In Building Structures'

Tobias Müller  
Bambus-Seminar an der RWTH-Aachen  
Betreuerin: Evelin Rottke

### Einleitung

Einleitung  
Weshalb Bambus  
Aspekte der Arbeit

Das folgende Dokument soll die wichtigsten Aspekte aus der Doktorarbeit von J.J.A. Janssen aufführen, in spezieller Hinsicht auf das architektonische Verständnis für den Baustoff, die Bemessung und die Verwendung.

Einzelne Aspekte der Doktorarbeit sind vernachlässigt bzw. verkürzt worden, da sie bereits durch andere Referate unseres Seminars hinreichend abgedeckt worden sind (insbesondere Baumaterial Bambus, Mechanische Eigenschaften, sowie Verbindungen); auf das mikrobiologische Kapitel 2 wurde vollständig verzichtet.

### Weshalb Bambus

Einleitung  
Weshalb Bambus  
Aspekte der Arbeit

J.J.A. Janssen über die Entstehung dieser Doktorarbeit:

"The reason for the start of my research was a request made by the volunteers in developing countries. They asked technical advice on how to build bamboo trusses for schools and warehouses."

Da er diese Anfrage nicht genügend genau beantworten konnte, begann er, nach Literatur zu suchen. In den Archiven der holländischen Ost-Asiatischen Armee wurde er fündig. Das gefundene Material war vor allem aus den Jahren 1890 bis 1900 und er befand, dass diese Informationen noch immer den Entwicklungshelfern beim Bau verschiedener kleinerer Objekte helfen konnte. Aus diesem Grund veröffentlichte Janssen unter seinem Namen eine Wiederauflage (einige hundert Kopien wurden verteilt oder verkauft).

Auf diesem Wege wuchs sein Interesse am Baustoff Bambus, so daß er ein Forschungsprojekt entwickelte mit dem Verlangen so viel wie möglich über Träger und Binder für Hallen und Brückenkonstruktionen aus Bambus herauszufinden. Seine Zielsetzung lag dabei primär darauf, das Material möglichst soweit auszureizen, wie es, seiner Meinung nach bei Holz bereits der Fall ist. Gesucht: (Fachwerk-)Träger nach einem genormten Schema, universal einsetzbar, günstig und reproduzierbar.

### Aspekte der Arbeit

Einleitung  
Weshalb Bambus  
Aspekte der Arbeit

"What is needed is not more research into techniques, but bright ideas about how to get these techniques out of the laboratory and into actual building programmes" - laut Janssen ein häufiger Spruch wenn es um Forschungsarbeiten an Baustoffen geht. Doch das gesamte Wissen über Bambus, nicht mehr als ein paar Aktenordner, können, seiner Meinung nach, kaum zu diesen Baustoffen gehören, denn würde man alle Forschungsarbeiten über Holz zusammensammeln, dann würde man damit gut eine Halle füllen können. Im weiteren zählt er wichtige Aspekte auf, die elementare Gründe für ihn waren, diese Doktorarbeit zu schreiben:

- Umweltaspekt: Bambus kann einzeln nach Alter gefällt werden; jüngere Holme können stehen bleiben. Auf diesem Weg bleibt das Mikroklima erhalten und auch die Wirtschaft hat einen jährlichen Rhythmus (Holz-Bäume werden dagegen alle 20 bis 40 Jahre gefällt und lassen ganze Flächen brach liegen).

Material	Produktionsenergie	Belastungsfähigkeit	Verhältnis Energie/Belastung
Beton	1920 MJ/m <sup>3</sup>	8 N/mm <sup>2</sup>	240
Stahl	234000 MJ/m <sup>3</sup>	160 N/mm <sup>2</sup>	1500
Holz	600 MJ/m <sup>3</sup>	7,5 N/mm <sup>2</sup>	80
Bambus	300 MJ/m <sup>3</sup>	10 N/mm <sup>2</sup> (Schätzung)	30

- Kulturelle Ursprünge: Ziel von J.J.A. Janssen ist es ebenfalls, den Baustoff Bambus wieder "salonfähig" zu machen, da selbst in Heimatregionen von Bambus (und das gleiche gilt für traditionelle Baustoffe wie Lehm und Stroh z.B. in Afrika) dieser kein Ansehen, selbst bei der ärmeren Bevölkerungsschicht, hat.





- Mechanische Eigenschaften: Ein kurzer Vergleich (von links oben nach rechts unten: Spannungen, Effizienz, Normalkräfte, Biegungen)

material	working stress $\sigma$ N/mm <sup>2</sup>	E N/mm <sup>2</sup>	working strain $\epsilon$ in 10 <sup>-6</sup>	strain energy stored Joules/m <sup>3</sup> Joules/kg
concrete	8	25 000	300	1 200    0,5
steel	160	210 000	800	64 000    6,2
wood	7,5	11 000	700	2 400    4,3
bamboo	10?	20 000	500	2 500    4,2

material	working stress weight by volume	E weight by volume
Concrete	$\frac{8}{2400} = 0,003$	$\frac{25000}{2400} = 10$
Steel	$\frac{160}{7800} = 0,020$	$\frac{210000}{7800} = 27$
Wood	$\frac{7,5}{600} = 0,013$	$\frac{11000}{600} = 18$
Bamboo	$\frac{10}{600} = 0,017$	$\frac{20000}{600} = 33$

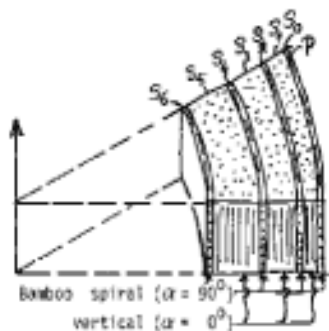
Einleitung  
Weshalb Bambus  
Aspekte der Arbeit

material	$\sqrt{E}$ weight by volume
Concrete	0,07
Steel	0,06
Wood	0,17
Bamboo	0,24 (if straight!)

material	stress N/mm <sup>2</sup>	cross-section mm	deflection mm	mass of bridge kg
Concrete (reinforced)	10		9	32
Steel	160		31	13
Wood	10		15	6
Bamboo	10		7,5	5

- Besondere Eigenschaften: Wie z.B. unter Erdbeneinfluß. Unter Vernachlässigung von der möglichen Brandgefahr bei Erdbeben ergibt sich folgender Ablauf beim Materialversagen: Stahl - Beton - Holz & Bambus, wobei das Holz und der Bambus am längsten einem Erdbeben standhalten können. Daraus ergibt sich auch ein Ansatz für einen späteren Einsatz von Bambusbauten in erdbebengefährdeten Regionen für den Wohnungsbau (eventuell Verbund?)

## Mathematisches



Dieses Kapitel beschäftigt sich im generellen mit mathematischen Methoden die für den Architekten in ihrer Herleitung nicht entwurfsrelevant sind, somit hier verkürzt Janssens Ergebnisse (alles jeweils Bezogen auf eine einzelne Bambusfaser): Hier wird in seiner Doktorarbeit ein vereinfachendes mathematische Verfahren aufgezeigt, mit dem die Zugfestigkeit von Bambus annähernd errechnet werden kann (gleichfalls gilt dieses Verfahren auch für Holz). Ebenso errechnet er ein Verfahren um Belastungen sowie Verformungen zu bestimmen. Bei der Ermittlung dieser Verfahren greift er allerdings auf eine größere Menge an Einflußfaktoren zurück (Feuchtegehalt, Größe, Alter, ...), so daß auch sein Ergebnis leider nicht für eine überschlägliche Dimensionierung im Sinne eines Tabellenwerkes herangezogen werden kann. Ein weiteres Ergebnis von ihm ist, daß die Anzahl der horizontalen gegenüber vertikal verlaufenden Röhren relevant ist (für Zug und Druckverhalten ist dies auch direkt einsichtig), aber die Anzahl der Zellschichten für die Festigkeit und die Beanspruchbarkeit keine Rolle spielen (nicht unbedingt ersichtlich, z.B. Holz im Vergleich zu Brettschichtholz).

## Versuche/Mechanik

Versuche/Mechanik

Druck

Biegung

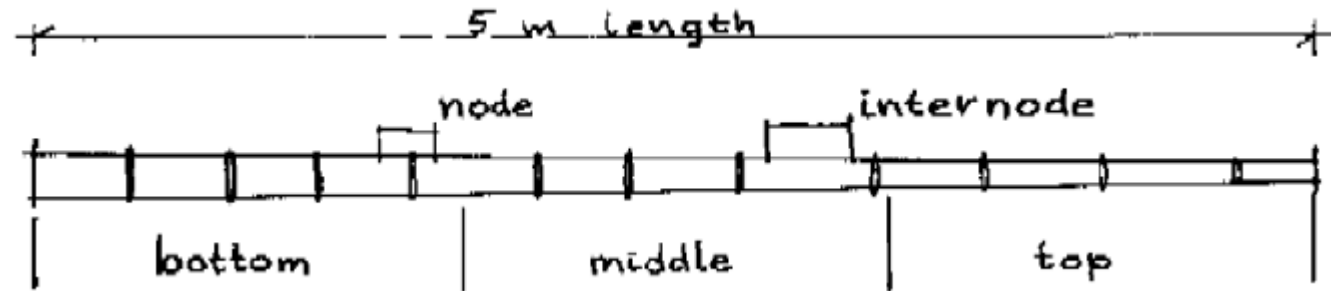
Scherkraft

Um die Möglichkeiten bei der Verwendung von Bambus herauszufinden mußte J.J.A. Janssen die mechanischen Eigenschaften des Bambus' untersuchen. Wichtig war ihm in diesem Zusammenhang die statistische Analyse sowie das Verhältnis zwischen biologischen Strukturen und dem Tragverhalten. Ein Problem bereitete Janssen bei der Durchführung seiner Untersuchungen die Tatsache, daß es keine genormten Verfahren für Bambus gibt (zumindest keinen einheitlichen - der einzige relativ feststehende Standart war der Indische Standart von 1973). In einem späteren Kapitel gibt er Empfehlungen zu einem - noch zu definierenden - Standart. Sein Augenmerk lag in den folgenden Absätzen vor allem auf Konstruktionen und Verbindungen sowie den daraus resultierenden Kräften, da er ja einen speziellen Träger als Universal-Bauteil errechnen wollte.

Einflußfaktoren für seine Testreihen und Voraussetzungen sind:

- Sorte und Alter des Bambus: dreijähriger *Bambusa blumeana* aus den Philippinen
  - Grün oder Gelagert: jeweils gelagert bis zum einem Feuchtigkeitsequilibrium mit der Luft, z.B. 70%, nur speziell getesteter Grüner Bambus ist frisch geschnitten (Feuchtigkeitsgehalt von 60-100%)
  - Feuchtigkeitsgehalt: Die meisten Test wurden in drei Teile gegliedert: 30%, 50% und 70% rel. Feuchtigkeitsgehalt
  - Form und Größe
  - Knoten (Node) oder Zwischenstücke (Internode), Kennzeichnung bei den Versuchen nur wenn es sich um ein Stück mit Knoten handelt.
  - Position am Holm: Oben, Mitte, Unten
  - Geschwindigkeit der Belastungen nach DIN oder Indischer Norm
  - Lang und Kurzzeitbelastungen
- Masse pro Volumen kann leider nicht als Parameter gewählt werden, somit ist eine größere Feldstreuung bei den

Versuchen zu erwarten (Statistik)



## Druck

Versuche/Mechanik

Druck

Biegung

Scherkraft

In der Maschine links auf dem Bild führte Janssen seine Druckbelastungen von Bambusteilen durch. Er belastete sowohl Stücke mit Knoten, als auch welche ohne. Die genau Tabelle seiner Ergebnisse befindet sich auf der rechten Leiste (Durch Mausclick wird dieses Fenster vergrößert). Zum Vergleich ältere Literaturwerte:

Meyer und Ekelund: 44 N/mm<sup>2</sup>

Espinosa: 57 N/mm<sup>2</sup>

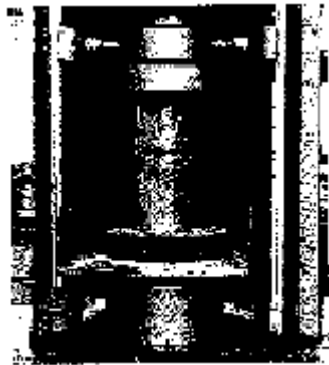
McClure: 35 N/mm<sup>2</sup>

Glenn: 51 N/mm<sup>2</sup>

Limaye: 44-74 N/mm<sup>2</sup>

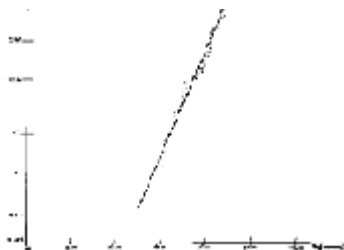
Atrops: 40-43 N/mm<sup>2</sup>

Sekhar: 46-85 N/mm<sup>2</sup>



Anmerkung: Es wurden nicht die gleichen Bambusarten getestet - Streuung durch Merkmale der einzelnen Art möglich, auch wenn Janssen dies fast ganz ausschließt (geringe physikalische und biologische Unterschiede zwischen den Pflanzen). Außerdem ist z.T. nicht exakt überliefert worden, wie getestet wurde und unter welchen Zuständen des Bambus (Feuchtigkeitsgehalt, Dauer der Einwirkung, Geschwindigkeit, Alter und Größe des Sproß, ...).

J.J.A. Janssens Ergebnisse lagen - vor einer Analyse der Variationsmöglichkeiten (siehe oben) - alle im Bereich von 60 bis 110 N/mm<sup>2</sup> mit nur einem statistischem Ausreißer nach 176 N/mm<sup>2</sup>. Unter Einbeziehung der möglichen Abweichungen und Verschiebungen kam er auf 50-79 N/mm<sup>2</sup> entsprechend etwa 0,094 x G [kg/m<sup>3</sup>].





## Biegung

Versuche/Mechanik

Druck

Biegung

Scherkraft

Seine Tests auf Biegung führte Janssen mit einer großen Presse bzw. durch fest montierte Biegemaschinen durch. Es handelte sich bei allen diesen Versuchen um dreijährige Bambusholme, gespannt über 7m Länge für Kurzzeittests und 4,5 m für Dauerbelastungstests. Die Lasteinwirkungen wurden durch die im Indischen Standart vorgegebene Weise in den Träger eingeführt.

Es handelt sich hierbei um ein zwei-Punkte bzw. vier Punkte Meßverfahren (im Gegensatz dazu gibt es noch das drei-Punkte Verfahren, welches Janssen aber auf Grund der technischen Meßmöglichkeiten nicht anwenden konnte).

Seine Ergebnisse für Langzeit und Kurzzeittest sahen folgendermaßen aus:



### Kurzzeittest

Endgültige Belastbarkeit

Durchschnitt/Abweichung

84 N/mm<sup>2</sup> / 26 N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Tests

9

E-Moduli

20500 / 3400

9

### Langzeittest

Endgültige Belastbarkeit

Durchschnitt

41 N/mm<sup>2</sup>

Deformation (Langzeit/Bruch)

1,25 mm / 2,4 mm

Abweichung

10 N/mm<sup>2</sup>

0,4 mm / 0,57 mm



Einzigste Einschränkungen bei seinen Tests waren die zur Verfügung stehende Größe des Raumes und der insgesamt für seine Forschungen freigegebene Bereich.

## Scherkraft

Versuche/Mechanik

Druck

Biegung

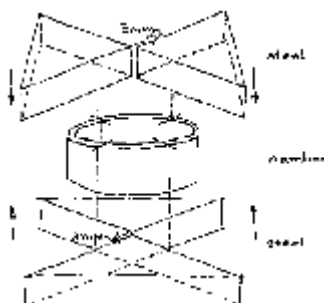
Scherkraft

Scherkräfte sind der Schwachpunkt von Bambus aufgrund seiner biologischen und physikalischen Konstruktion. Bereits 1922 wurde durch Meyer und Ekelund gezeigt, daß im Vergleich zu Holz Bambus zwar genauso gut Biegung und Druck, aber keine Scherbeanspruchung aufnehmen kann.

Alle Aspekt von Scherbeanspruchungen, z.B. bei Verbindungen, sind jedoch noch nie zusammenfassend beantwortet worden, so J.J.A. Janssen. Hier eine kleine Tabelle von Literaturwerten, die er herausgefunden hat; ganz links Janssens Testmethode:

decreases with  
increasing  
wall-thickness

Janssen konnte diese Literaturwerte in seinen Versuchen bestätigen und fand auch das Verhältnis zur Masse heraus:  
T = 0,024 \* G / (mm<sup>2</sup>) (In dieser Formel kann abhängig vom



author	ultimate shear stress in N/mm <sup>2</sup>	test method	no. of tests	remarks
Blayer and Ebrahimi	5.1	3- and 4-point bending tests	150	no data on species, age, humid. type etc.
Jansen	7.1	Fig. 4.6.2	4	green bamboo, internode
	8.1	Fig. 4.6.2	2	green bamboo, node
	8.1	Fig. 4.6.2	6	dry bamboo, internode
	8.0	Fig. 4.6.2	8	dry bamboo, node
Ibidem, Chahar	13.8	description is not clear	7	node
	18.5		6	internode
Ibidem, Licoreson, Motz, Oka	3.7	Fig. 4.6.1	3	green bamboo Phyllostachys pubescens
	13.5		5	Moisture content: 19.2%
	16.5		5	highest values with H=22mm and W=20mm
				lowest values: H=40mm and W=20mm
				Phyllostachys reticulata
Saidi et al.	14.2	Fig. 4.6.3	1	C. Kochigridata
	11.7		3	content: 14.8%
		Fig. 4.6.1		Bambusa rubra, green, MC: 75-100 per year
				W=18,25,37,50mm
				H=25,37,50mm
	6.7		24	age 1 year
	7.4		36	age 2 years
	7.9		36	age 3 years
9.8	36	age 4 years		
11.8	36	age 5 years		
Average	19.6	Fig. 4.6.4	32	dry bamboo
	16.7	Fig. 4.6.4	32	dry bamboo shear strength

$f = 0,021 \times G$  [kg/mm<sup>2</sup>] (in dieser Formel kann abhängig vom gegebenen Gewicht die Scherkraft ermittelt werden).

### Träger/Verbindungen

Verbindungen  
Träger

Jansen untersuchte bei den Verbindungen vor allem auch die für Träger und Binder notwendigen Verbindungen. Hier werden die verwendeten Typen nur im generellen vorgestellt, genauere Angaben fließen in die beiden folgenden Referate ein (Verbindungsmittel und Mechanik). In Abfolge jetzt ein paar Verbindungen und die getesteten Träger samt Ergebnis der Belastungsversuche und Annahmen.

### Bolzen/Stäbe

Träger/Verbindungen  
Bolzen/Stäbe  
Verbindungen  
Träger

Bolzen auf Langzeitbeanspruchung bzw. Stäbe sind elementare Bestandteile vieler Verbindungen. Einer Janssens erster Schritte bezog sich folglich auf die genauere Untersuchung dieser Hilfsmittel. Die aus diesen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse sind in diesen beiden Graphen zu finden:

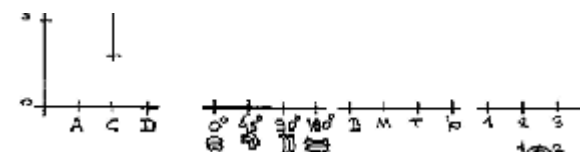
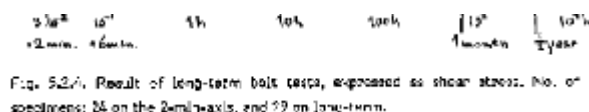
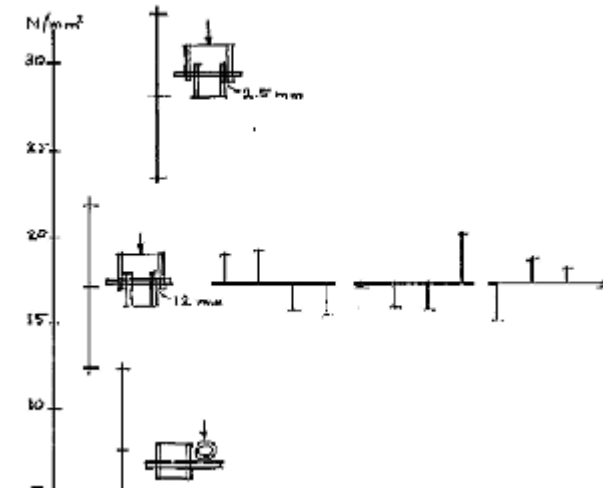
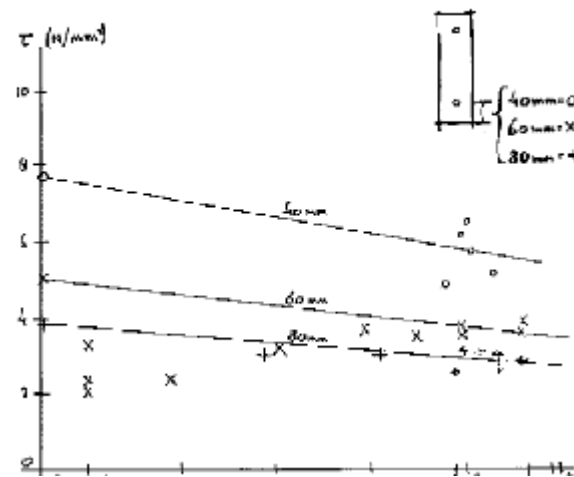


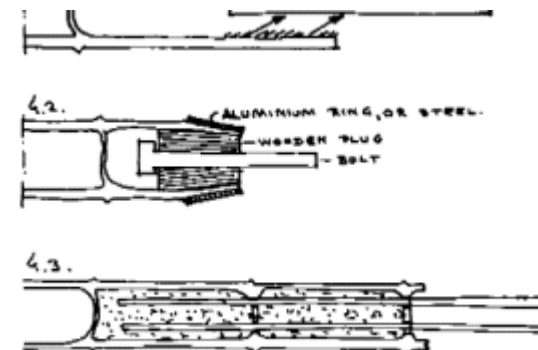
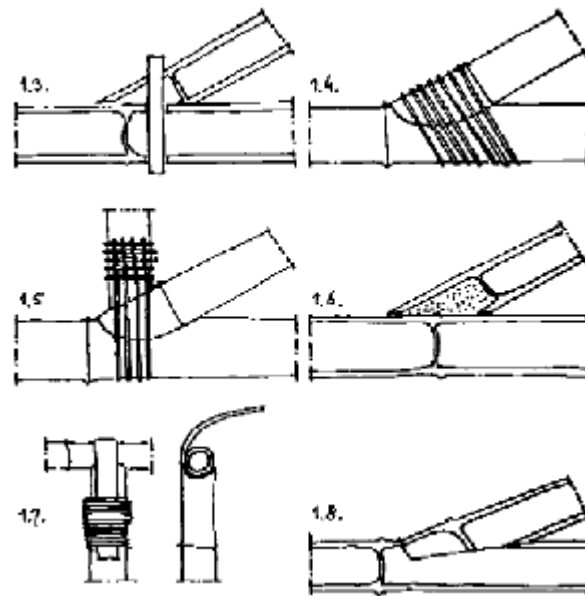
Fig. 5.5.5. Results of tests on pins. Explanation in text.



## Verbindungen

- Träger/Verbindungen
- Bolzen/Stäbe
- Verbindungen
- Träger

Dieses sind die verschiedenen Verbindungstypen, die in Janssens Bindern Anwendung finden. Aus jeder Gruppe an Verbindungen entschied er sich jeweils für einen Typ (erkennbar, wenn auf die Gruppe geklickt wird - das grau hinterlegte Bild ist der gewählte Typ). Eine kleine Erläuterung findet sich unter den Bildern.





Aufbau des Versuchs

Versuche mit verschiedenen Modifikationen ein und derselben Verbindung (Skizze und Datenblatt)

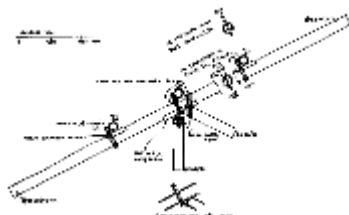


Table 1.5. (Caption: Skizzen einer typischen Verbindung)

Specimen No.	Label	Initial appearance	Notes
1	1.1	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate
2	1.2	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate
3	1.3	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate
4	1.4	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate
5	1.5	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate
6	1.6	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate
7	1.7	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate
8	1.8	Applied adhesive to cable and to plate	Vertical with 30mm gap between cable and plate

Note: The specimens were tested in the vertical position and the loading was applied to the upper end of the cable. The test results are given in the report.



- Aus dieser Gruppe wurde 1.3 gewählt.
- 1.1: geklebt, schlecht für Zugkräfte
  - 1.2: geklebt, schlecht für Zugkräfte
  - 1.3: Scherkraftproblem aus 1.2 gelöst besser für Zugkräfte
  - 1.4: Größere Verformungen als 1.3
  - 1.5: Seile könnten rutschen/sich lockern
  - 1.6: Festigung des schrägen Endes
  - 1.7: siehe 1.5, häufig mit Metall
  - 1.8: sehr lose und schwach

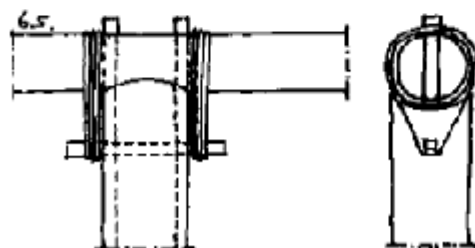
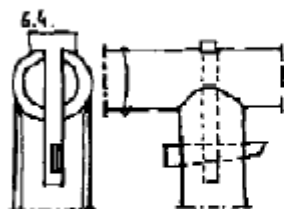
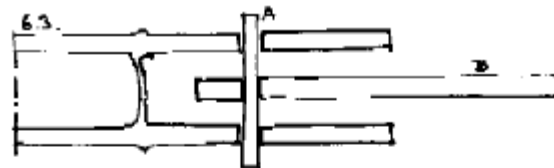
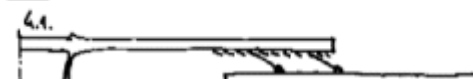
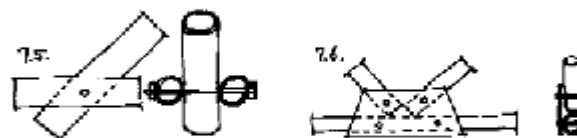
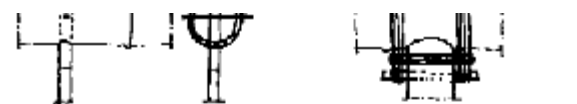


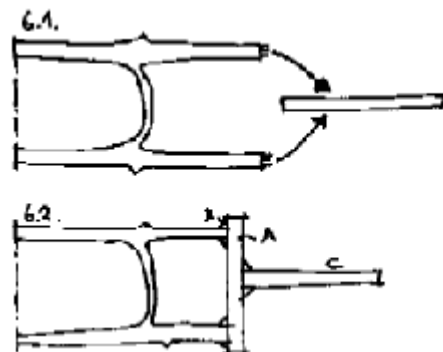
Fig. 5.4.3.



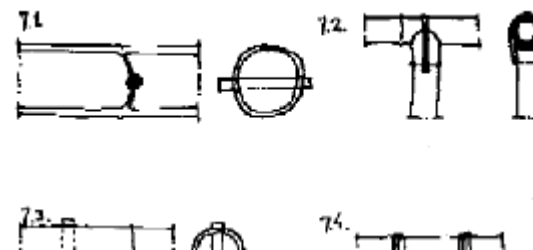
- Aus dieser Gruppe wurde <keine> gewählt.
- 4.1: Prinzipskizze
  - 4.2: Holzpfropfen mit Bolzen und Metallring
  - 4.3: Russische Lösung: Einbetonierte Stähle







- Aus dieser Gruppe wurde 6.5 gewählt.
- 6.1: Prinzipskizze
  - 6.2: Kleber an Punkt B ist Schwachstelle
  - 6.3: Schwachstelle sind Scherkräfte bei Stäben
  - 6.4: Vertikale Zugfestigkeit ist gering
  - 6.5: "Hörner" für Scherkräfte, Seil für Zug, Aufliegende Fläche für Druck

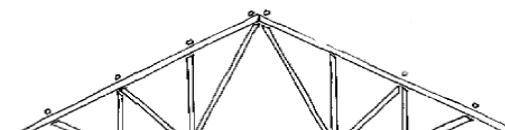


- Aus dieser Gruppe wurde 1.3 gewählt.
- 7.1: Prinzipskizze
  - 7.2: Nur Seil, bekannte Verbindung aus Zäunen
  - 7.3: Nur für Zugkraft im kleineren Bambus geeignet
  - 7.4: Zug und Druckkraft geeignet
  - 7.5: Stahlbolzen, steiff (Stahl kann substituiert werden)
  - 7.6: Alternative zu 7.5, simpel und robust
  - 7.7: Alternative zu 7.5, "trauriger Anblick"
  - 7.8: Blöcke mit Stahlbolzen befestigt, nur für Druck

## Träger

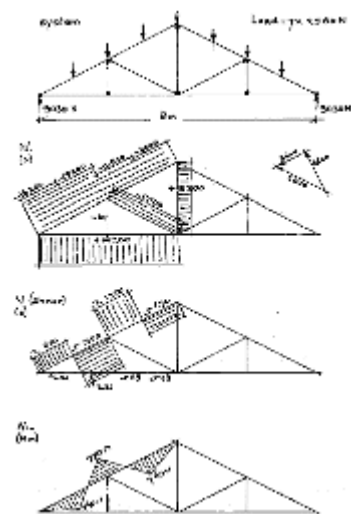
Hier eine Zeichnung der Träger 1, 2 und 3. Sie unterscheiden sich jeweils nur in Ihren Abmessungen der Bambusrohre.

Träger/Verbindungen  
Bolzen/Stäbe  
Verbindungen  
Träger



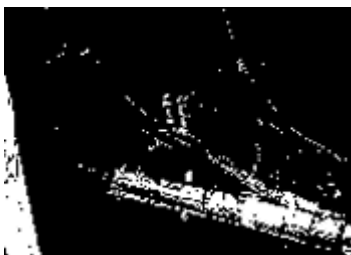


Ergebnisse des Vergleich der drei getesteten Träger:



Systemskizze des Janssenträgers; die Form wurde durchweg beibehalten

Bruch der Verbindungsstelle



	truss 1	truss 2	truss 3	units
Mean $\delta$ upper beams	104/86	98/79	102/82	mm
Deformation at 18 kN loading, elastic/permanent,				
first time	51/10	50/14	37/15	mm
second	44/8	36/3	26/4	mm
third	51	39	30/-	mm
fourth	-	-	40	mm
mean	48	42	33	
stiffness column joint	-	1650	1000	N/mm
Creep in 5 hours	14	12	9	mm
Load at failure	23(140%)	29(160%)	29(160%)	kN
$\sigma$ at failure	50?	37/46	41	N/mm <sup>2</sup>

Ergebnisse in bestimmten Beziehungen, z.B. Analyse welchen Einfluß hat ein Nodien oder Internodienbereich auf die aufnehmbare Druckkraft, Scherkraft und Biegung. Konstruktives Ergebnis, als Hintergrund für Entwurfstätigkeiten gedachte Betrachtung.

(see par. 4.5.5.)



influence of	on → compression	bending	shear
percentage fibres	significant	stress: unknown relationship E: significant	significant without physical meaning
weight by volume, (G)	} 12% MC: $\sigma = 0,094 \text{ G}$ , green: $\sigma = 0,075 \text{ G}$ .	12% MC: $\sigma = 0,14 \text{ G}$ , green: $\sigma = 0,11 \text{ G}$ .	12% MC: $T = 0,021 \text{ G}$
moisture content (MC)			
$\sigma$ or $T$ = ultimate stress in $\text{N}/\text{mm}^2$ , green = freshly cut bamboo, MC = 60 to 100%.			
position along culm	significant, top is stronger	significant, top is weaker, but stiffer.	significant, top is weaker.
node or internode	<u>not</u> significant	short spans: significant, long spans: not significant	significant, internode is stronger

Abschließende Zusammenfassung der herausgefundenen Schwachstellen und Stärken von Bambus:

### Summary:

#### strong points

tension//axis

compression//axis

bending

form of cross-section

#### weak points

compression ⊥ axis

shear//axis

#### unknown

shear ⊥ axis

tension ⊥ axis

torsion

stress concentr.

around holes.

### Recommendations how to build with bamboo:

Make your designs based on the strong points, avoid the weak ones, and do research on the unknown points.

Literatur / Url

Literaturliste

Julius Joseph Antonius Janssen, Proefschrift "Bamboo In Building Structures", technische Wetenschappen aan de technische Hogeschool Eindhoven, Mai 1981

## Url

<http://delphi.tue.nl/extra/proefschrift/PRF3B/8104676.pdf>

