

Fundamentals Of The Design Of Bamboo Structures

Oscar Antonio Arce-Villalobos

Oscar Antonio Arce-Villalobos beschäftigte sich vier Jahre lang mit dem Thema Bambus, um den Dokortitel zu erlangen. Die daraus verfasste Doktorarbeit entstand an der [Technischen Universität Eindhoven](#) (NL) unter Prof. Dr. J. H. van Lint und wurde fertiggestellt im September 1993.

Die hier aufgeführte Zusammenfassung der Promotion hat keineswegs den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern versucht vielmehr den Leitgedanken des Autors herauszufiltern, ohne näher auf die durchgeführten Versuche und Berechnungen einzugehen.

INTRO

The final goal of structural engineering is the design of effective, safe and socially accepted structures. The final goal of the research reported here is to contribute to the design of bamboo structures in that same spirit.

Zitat aus dem Vorwort

Die Leitgedanken der gesamten Doktorarbeit sind dem Zitat zu entnehmen. So beschäftigt sich Arce-Villalobos in seiner Einleitung mit dem Problem der Akzeptanz von Bambus als Baustoff. Selbst in den Regionen der sogenannten 3. Welt Länder findet Bambus als Baustoff nur wenig Anklang, da die daraus entstehende Architektur als ärmlich angesehen wird. Dazu kommt, dass selbst die Architekten und sonstige Diplom - Ingenieure lieber auf besser erforschte und mehr erprobte Baustoffe ausweichen.

Das schnelle Wachstum von Bambus, seine Stabilität, und vor allen Dingen das Bedürfnis nach kostengünstigen Bauten vor Augen, fordert Arce-Villalobos mehr Akzeptanz für diesen ökologischen Baustoff und leistet mit seiner Doktorarbeit einen weiteren Schritt in Richtung Forschung, die seiner Meinung nach noch viel intensiver betrieben werden muss.

DIE STRUKTUR DES BAMBUSHALMES

Um materialgerecht bauen zu können ist eine genaue Betrachtung des Materials unabdingbar. So beschäftigt sich Arce-Villalobos ausführlich mit der Struktur des Werkstoffes.

Die meisten Bambusarten weisen einen hohlen Halm auf, der durch Knoten unterteilt ist. An den Nodien (Knotenpunkten) werden die sogenannten Internodien (Zwischenstücke) durch eine querliegende Wand, dem Diaphragma, unterteilt. Das Bambusmaterial besteht aus einer Matrix, die die Fasern zusammenhält. Diese Fasern verlaufen axial und verdichten sich am oberen Ende eines Halmes, sowie am äußeren Rand. An den Nodien verlaufen die Fasern in das Innere des Halmes oder enden vorher. Radiale Faserstrukturen existieren nicht. Die Masse des Bambus setzt sich hauptsächlich aus 50% Zellulose und bis zu 30% Lignin, dem Zellklebstoff, zusammen. Bambushalme verjüngen sich nach oben und die Wandstärke nimmt ab. Das Schwindverhalten bei der Trocknung ist im Gegensatz zu Holz eher gering. So ergaben Versuche, in denen frisch geschlagener Bambus mit 140% Feuchtegehalt bis auf verbauungsgeeignete 20% heruntergetrocknet wurde, einen Schwund von 3-14% in axialer Richtung. Hierbei ist zu beachten, dass durch auftretende Tangential- und

Längskräfte sehr schnell Trocknungsrisse entstehen können.

TANGENTIALKRÄFTE

Aufgrund der axialen, unidirektionalen Ausrichtung der Fasern ist das Material Bambus nicht besonders für tangentialer Krafteinleitungen geeignet. So beträgt im Durchschnitt der Elastizitätsmodul in tangentialer Richtung nur $1/8$ des E-Moduls in Richtung der Fasern. Das Material ist also wenig geeignet, um solche Kräfte aufzunehmen, da es sehr schnell aufbricht. Dabei sind die Bambusarten *Guadua s.p.* und *Bambusa Blumeana* am ehesten geeignet, quer auftretende Kräfte aufzunehmen. Einen charakteristischen Wert der beiden Spezies zu ermitteln, war jedoch nicht möglich. Ebenfalls unmöglich war es dem Autor, einen Zusammenhang von aufnehmbarer, quereinwirkender Kraft und der Dichte des Materials herauszufinden. Jedoch steht fest, dass der äußere, dichtere Bereich des Bambushalmes eher in der Lage ist, solche Kräfte aufzunehmen, und dass Risse in dichteren Faserbereichen mehr Energie benötigen, um sich fortzusetzen.

AXIALKRÄFTE

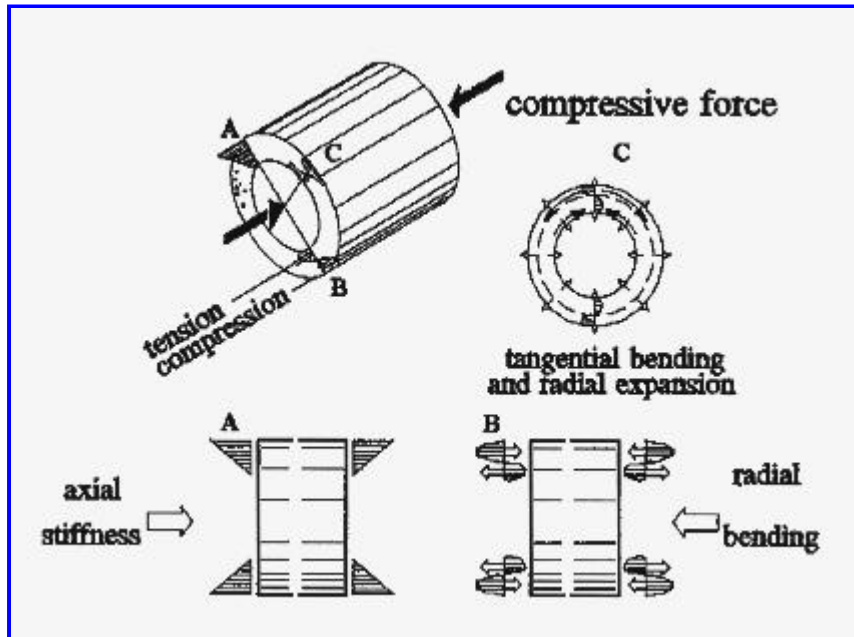


FIG 2

Im Gegensatz zu den quereingeleiteten Kräften, konnte bei axial eingeleiteten Kräften ein Zusammenhang von Stabilität und Dichte herausgefunden werden. Je dichter die Fasern sind, desto widerstandsfähiger ist das Material. Jedoch weisen die Nodien als schwächstes Glied nur eine Festigkeit von 40% (im Vergleich zu den Internodien) auf. Dafür verleihen die Nodien dem Bambus eine hohe Elastizität, ihr E-Modul ist 40% geringer als das der Internodien. Wird eine Kraft axial eingeleitet, so wird diese vom äußeren Bereich des Bambusquerschnitts aufgenommen. Dieses führt zu ungleichmäßiger Verteilung des Drucks, so dass sich Spannungen aufbauen (s.h. FIG2). Während die äußere Schicht sich tangential ausdehnt, so zieht sich das

Innere zusammen. Dieser Druckunterschied kann zu radialen Rissen führen, in FIG2 oben rechts durch Pfeile angedeutet.

Obwohl Arce-Villalobos nicht das Verhalten des gesamten Halms unter senkrechter Krafteinwirkung untersucht hat, so stellt er jedoch heraus, dass wegen Ausbeulung und Knickgefahr das verbaute Material so kurz wie möglich gehalten werden soll. Das Material der Spezies *Bambusa Blumeana* weist eine Druckfestigkeit von 270 N/mm^2 auf, jedoch ist mit diesem Wert keine Berechnung des gesamten Halmes möglich, da die Nodien (Druckfestigkeit 79 N/mm^2) und die Form des Halmes den Wert beträchtlich herabsetzen. Es wird geschätzt, dass durch die genannten Beeinflussungen die durchschnittlichen Werte um bis zu 80% vermindert werden können. Einen positiven Effekt haben die Nodien dennoch, sie vermindern die Ausbeulung des Materials dadurch, dass sich die Fasern, ähnlich einer

mehrfachgekrümmten Fläche, zur Halmmitte hin biegen, und somit dem System eine gewisse Stabilität verleihen. Versuche, die herausstellen sollten, wie sich das Material unter Kompression verhält, gestalteten sich äußerst schwierig. Reibung und Steifigkeit der Versuchseinrichtungen führten oft zu falschen Ergebnissen. Arce-Villalobos achtete dabei sehr darauf, die Versuche unter möglichst realen Bedingungen durchzuführen, was aber nahezu unmöglich war. Weitere Forschungsarbeiten sind hier notwendig um das Material exakter bestimmen zu können. Besonders die ungleichmäßige Form, die Nodien und die hohe Artenvielfalt seien Schwachpunkte, die das Material noch "unberechenbar" machen.

KLEBBARKEIT

Die traditionelle Verarbeitung von Bambus sieht die Verklebung als Verbindungsmittel nicht vor. Üblich waren hier vielmehr handwerklich hergestellte Verbindungen. Daher wurde bisher wenig Forschungsarbeit in die Klebbarkeit von Bambus investiert. Dem Autor scheint die Anwendung von Klebstoffen allerdings sehr sinnvoll, da Verklebungen entstandene Risse ausgleichen können. Vielmehr noch ist man mittels Leim in der Lage, stoffschlüssige Verbindungen herzustellen, in denen die Verklebung die Fasern an den Spannungshochpunkten zusammenhält und einem Zerfasern der Kontaktstellen entgegenwirkt. Arce-Villalobos bediente sich bei seinen Versuchen herkömmlichen PVAc - Leims, Resorcinleims, Harnstoffformaldehydleims und Phenolharzes. Diese, aus der Holzverarbeitung und auch aus der Bambus-Sperrholzproduktion bekannten Klebstoffe erwiesen sich als sehr geeignet. Untersucht wurden nur Verleimungen von Holz mit Bambusmaterial der inneren Schichten, da dieses dem Autor als am wichtigsten erschien. Die Art des Holzes, die Dichte des Bambus, die Dicke des Materials und die Art des Klebstoffs scheinen keinen signifikanten Einfluss auf die Qualität der Verklebung zu haben. Der geringen Scherfestigkeit des Bambus wegen spielen diese Kriterien eine untergeordnete Rolle, da der Bambus das schwächste Glied darstellt. Vielmehr ist bei der Wahl des Klebstoffs auf ganz andere Kriterien, wie Kosten, Beschaffung, Verträglichkeit mit Holzschutzmitteln und Konsistenz des Leims zu achten. An dieser Stelle der Promotion werden Versuche beschrieben, die das Verhalten von Bambus - Holz Verleimungen unter Lastwechsel untersuchen. So wird in der ersten Versuchsreihe in

regelmäßigen, kurz aufeinanderfolgenden Intervallen eine Last eingeleitet. Hierbei wurde die Last abwechselnd von 10% - 100% der aufnehmbaren Last eingeleitet. Die Versuchsreihe führte jedoch zu keinen Ergebnissen, da die Ergebnisse nicht eindeutig auswertbar waren. Darauf hin versuchte Arce-Villalobos den Fall eines Erdbebens nachzuempfinden und kam zu dem Ergebnis, dass sich das Material dieser Art von Lastwechsel gegenüber neutral verhält, eben so, als würde eine konstant ansteigende Last einwirken.

BAMBUSVERBINDUNGEN

Historische Bambusverbindungen bestehen zumeist aus zusammengeschnürten Bambushalmen. Die Schnüre selbst waren aus einem organischen Material wie zum Beispiel Bambus selbst. Heute noch werden Verbindungen auf diese Weise hergestellt, allerdings ersetzen Kunststoffe oder Metalldrähte die organischen Schnüren. In

China beispielsweise werden bis zu 40 Stockwerk - hohe Gerüste auf diese Art und Weise hergestellt. Zwar ist mit diesen Verbindungen ein ausreichendes Ergebnis zu erreichen, aber die Nachteile liegen auf der Hand: Da der Bambus schwindet, löst er sich mit der Zeit aus der Verbindung; die Oberfläche des Bambus ist sehr glatt, somit bereitet die fehlende Reibung Schwierigkeiten; die Verbindung wird durch die Überlappung mehrerer Halme sehr massiv und führt zu exzentrischen Krafteinleitungen, was wiederum Momente erzeugt, welche schlecht vom Material aufgenommen werden können; um eine Überlagerung der Elemente zu vermeiden ist eine handwerklich sehr aufwendige und anspruchsvolle Anpassung der einzelnen Halme aneinander notwendig. Bambusmöbel, die mittels solcher Verbindungen hergestellt werden sind selbst in den Regionen Luxusgüter, in denen der Bambus beheimatet ist, da diese

Verbindungen so sehr aufwendig in der Herstellung sind.

Arce-Villalobos listet die zu erzielenden Eigenschaften einer Verbindung auf. In erster Linie ist darauf zu achten, dass das Material nicht durch Bohrungen, Schrauben, Nägel oder Bolzen geschwächt wird. Aufgrund der Bambusstruktur sollten offene Enden gegen ein Zerfasern geschützt sein. Ein Verschließen der Enden ist aufgrund von Schädlingen ebenfalls anzuraten. So wurden früher oft an Eckverbindungen Nodien aneinandergesetzt, da diese aufgrund der Faserstruktur eher gegen ein Zersplittern geschützt sind und das Diaphragma ein Eindringen von Schädlingen verhindert. Aufgrund der willkürlichen Lage der Knotenpunkte entlang eines Bambushalmes ist dieses Verfahren jedoch nur schwer zu verwirklichen. Als Leitfaden gilt ebenfalls, sich die positiven Eigenschaften zu Nutzen zu machen. So sollte die Kraft möglichst nicht tangential sondern axial eingeleitet werden um

Momente zu vermeiden. Da der Bambus als kostengünstiges und ökologisch sinnvolles Baumaterial zu sehen ist, ist eine Nutzung in ärmeren Regionen anzustreben. Daraus ergeben sich zusätzlich Anforderungen an die einfache Herstellung einer Verbindung, die niedrigen Kosten, die Verfügbarkeit der benötigten Materialien, die Haltbarkeit und an den Wartungsaufwand des errichteten Systems. Zuletzt sei erwähnt, dass die Verbindungen so leicht wie möglich ausgebildet werden sollten. Schließlich ist das geringe Gewicht eine der positiven Eigenschaften des Bambus, welche nicht durch zu schwere Ausführungen von Verbindungen zunichte gemacht werden sollte.

Im Laufe der Zeit wurden einige Alternativen zur Schnürung entwickelt. Der Autor listet hier aber nur wenige auf, um sich später auf eine, ihm am sinnvollsten erscheinende Konstruktion zu vertiefen. FIG3 zeigt einen

Knotenpunkt mehrerer Bambushalme, die zwischen zwei Stahlplatten gespannt sind. Hervorzuheben ist hier die Steifigkeit der Verbindung, welche durch die Metallplatten gewährleistet wird. Um eine Schwächung des Materials durch die Verbolzung zu vermeiden ist es sinnvoll, die Halme mittels Schnürungen an die Platten zu fixieren, wobei die Steifigkeit der Verbindung wiederum sehr von der Schnürung abhängt. Auf diese Art und Weise wurde ein Dom in Indien mit zufriedenstellenden Ergebnissen erbaut.

Duff entwickelte die in FIG4 dargestellte Verbindung. Hierbei wurden vier Bambushalme mittels eines vorgeformten Stahlfittings verbunden. Diese Art der Verbindung weist einige Vorteile, wie Steifigkeit, Verschluss und Schutz der Enden auf, jedoch ist die Herstellung der entsprechenden Fittings sehr aufwendig.

Spoer verfüllte 1982 das offene Bambusende mit Mörtel und fixierte damit eine Metallhülse

in dem Hohlraum (s.h. FIG5). In dieser Hülse konnte er Schrauben befestigen, um daran weitere Halme anzuschließen. Dem Zerfasern des Endstückes entgegenzuwirken, verstärkte er den gefährdeten Bereich mit einer festen Schnürung.

Als ein optimales System sieht Arce-Villalobos das Verwenden von Wood-Fittings. Wie in FIG6 dargestellt, wird ein vorgefertigtes Holzstück in den Bambushohlraum eingeleimt. Vorteile sind: die Verbindung ist einfach und von ungelernten Arbeitskräften herzustellen, das offene Ende wird vollends geschützt und verstärkt, Verbindungen sind nach einfacher Holzbauweise herzustellen. Eine Vorfertigung der Fittings könnte in kleineren Workshops ebenfalls von ungelernten Kräften geschehen. Der ökonomische Vorteil bei der Verwendung von Holz besteht darin, dass Reststücke der Tropenholzgewinnung benutzt werden können, da die benötigten Abmessungen sehr klein sind. Wichtig ist bei der Herstellung einer

solchen Verbindung, dass das Innere des Bambus vor der Verleimung gereinigt wird. Dieses geschieht mit Schleifpapier, das in einer Bohrmaschine eingespannt wird. Auf diese Weise kann auch problemlos der Hohlraum um bis zu einen Zentimeter vergrößert, und somit an die Woodfittings angepasst werden. Zusätzlich muss der Bambus vor Ort abgelängt werden, was sich aber problemlos gestaltet, zumal die Fittings in der Lage sind, größere Toleranzen aufzunehmen, so sind auch keine Schifter- oder Gehrungsschnitte notwendig. Auf diese Weise ist eine Art des Modularen Bauens möglich, wobei der Baustoff Bambus in den Hintergrund tritt. In FIG7-11 sind einige Anschlussmöglichkeiten dargestellt. Hier ist wieder darauf zu achten, dass das Gewicht der Verbindungen nicht unmaßstäblich hoch ist. Die durch Stahlplatten gehaltene Verbindung, abgebildet in FIG11 stellt jedoch nur eine Alternative dar, sie erreicht lange nicht

die Steifigkeit, die durch Stahlfittings erreicht werden kann.

Obwohl es generell besser ist, einen Bambus größeren Querschnittes zu verwenden, als mehrere Halme parallel aneinander zu fügen, so reichen in manchen Situationen die Querschnitte nicht aus. In diesem Falle schlägt Arce-Villalobos die in FIG12-13 dargestellten Verbindungen vor. Die hier geforderten Stahlfittings könnten in einem großen Maßstab gefertigt werden und durch entsprechende Einrichtungen vertrieben werden.

EXTRO

General remark regarding bamboo as a structural material:

Structural materials have strengths and weaknesses, and it is up

to the structural engineer and architect to use them in the best possible way for the benefit not just of a specific client or idea, but for that of mankind as a whole. ...As a final statement the author wishes to share his enthusiasm in this sense, and to encourage engineers and architects, especially those colleagues who have bamboo available, to give it a chance by using all their inventiveness. Bamboo will pay back.

Zitat aus dem Nachwort

Quelle

English Translation of the official text on the titel page
FUNDAMENTALS OF THE DESIGN OF BAMBOO STRUCTURES
by Oscar Antonio Arce-Villalobos
Eindhoven, 21. Sept. 1993, ISBN 90-6814-524-X

Download

[Promotion in PDF-Format, Englisch, 262 Seiten
4,06MB - ZIP-File](#)