jugend forscht

Wettbewerb 2018

Jugend forscht

Projektbericht

Wie stabil ist eine Konstruktion aus Bambus und Beton?

Vorname: David

Nachname: Mohr

Klasse: 9a

Schulanschrift: Städt. St. Michael-Gymnasium Markt 11
53902 Bad Münstereifel

Regierungsbezirk der Schule: Köln

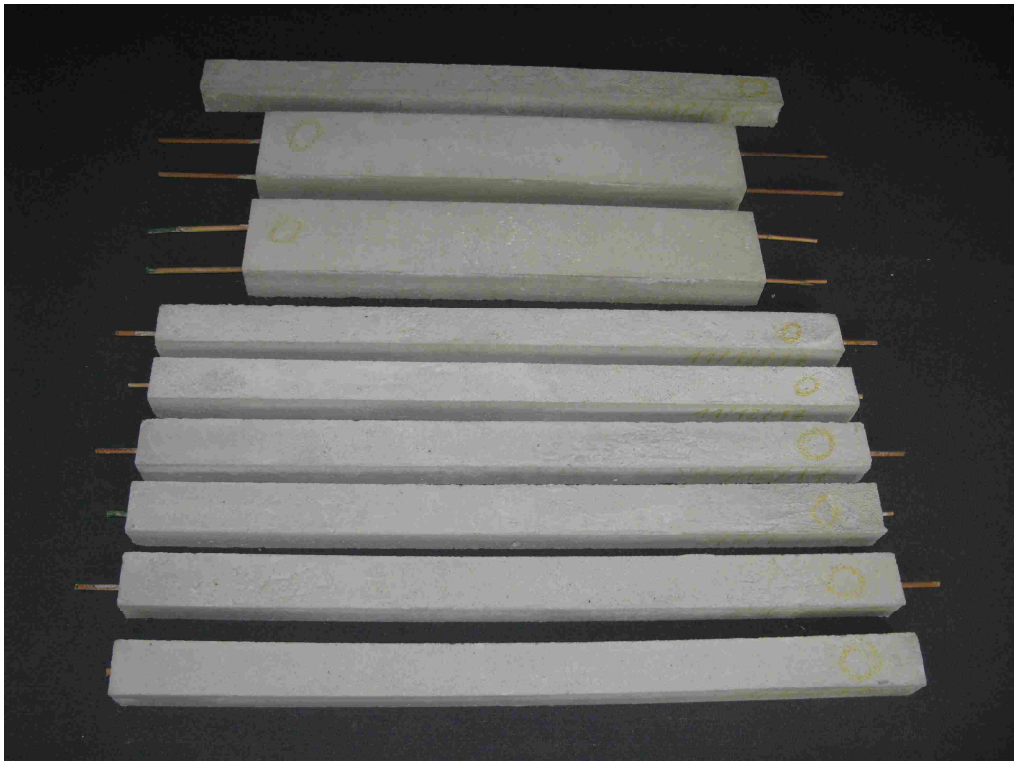

Abbildung 1: Probekörper für Tragfähigkeitsbestimmung (Quelle: eigenes Foto)

Kurzfassung

Diebstähle von Stahl und anderen Metallen an Baustellen und auch fertigen Gebäuden zeigen, wie wertvoll und begrenzt dieser Baustoff mittlerweile ist und rein zufällig fand ich eine Antwort auf meine Frage, ob es nicht eine Alternative oder Ergänzung geben könnte: Bambus.

Meine Überlegungen gehen dahin, dass man mit Hilfe von Bambus in Verbindung mit einem weiteren Werkstoff, wie z. B. Beton, ebenfalls stabile Bauteile und Bauwerke herstellen kann.

Bambus ist ein nachwachsender Rohstoff und hat einige besondere Eigenschaften, welche ihm eine hohe Stabilität verleihen.

In meinen Versuchen habe ich Betonbalken mit Stahlbewehrung sowie Betonbalken mit Bambus“bewehrung“ hergestellt, beide einer Lastprobe mit Hilfe einer selbstgebauten Prüfeinrichtung mit Drehdornpresse und einer Radlastwaage unterzogen.

Aufgrund meiner bisherigen Recherchen zu bereits vorgenommenen Versuchen mit Bambus sowie den eigenen Versuchen und Messungen komme ich zu dem Ergebnis, dass sich Bambus zumindest in einigen Bereichen als umweltfreundlicher und auch sehr kostengünstiger Werkstoff zur Herstellung von „Bambusbeton“ eignet, wobei die Materialeigenschaften sicher noch intensiver zu untersuchen sind. Bambus ist ein Naturprodukt und deshalb kann die Streuung der spezifischen Eigenschaften größer sein als bei einem künstlich hergestellten Baustoff.

Stahl lässt sich sicherlich nicht für alle Bauwerke vollständig ersetzen, doch mit einem gezielten Einsatz und unter Vermeidung von neuen Monokulturen könnte Bambus sicherlich einen Beitrag zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen auf der einen Seite und finanziell realisierbaren Bauten für die ärmere Bevölkerung (insbesondere in den Entwicklungsländern) leisten.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Kurzfassung…… 2
1 Einleitung…… 4
1.1 Themenwahl…… 4
1.2 Literatur und Hilfsmittel…… 5
2 Hauptteil…… 5
2.1 Materialien und Methode…… 5
2.1.1 Bambus…… 5
2.1.2 Beton…… 7
2.1.3 Betonstahl…… 7
2.1.4 Verbundwerkstoff Stahlbeton…… 8
2.2 Vorgehensweise und Probleme…… 8
2.3 Versuche und Auswertung…… 12
2.3.1 Versuche mit den Betonbalken…… 13
2.3.1.1 Prüfung der Betonbalken 1 und 2 und Auswertung…… 13
2.3.1.2 Prüfung der Betonbalken 3 bis 9 und Auswertung…… 14
2.4 Diskussion: Vor- und Nachteile von Bambus und Bambusbeton als Baustoff.. 17
3 Schluss…… 18
3.1 Fazit…… 18
3.2 Ausblick…… 18
3.3 Persönliche Erkenntnisse…… 18
4 Abbildungsverzeichnis…… 19
5 Tabellenverzeichnis…… 19
6 Quellen- und Literaturverzeichnis…… 19

1 Einleitung

1.1 Themenwahl

Die Idee zu dieser Arbeit kam mir bei einem Urlaub an der Ostsee in einem Zoo-Park. Dort war ein Tiergehege ganz aus Bambus gebaut. So etwas hatte ich noch nicht gesehen. Ich fand diese Bauweise so interessant, dass ich noch in den Ferien im Internet nach dem Zoo-Park „Arche Noah“ in Grömitz an der Ostsee recherchierte. Tatsächlich fand ich auch auf der Internetseite des Zoo-Parks einen Hinweis zu dem Bambusbau.

Angesichts des zu erwartenden Bedarfs an Wohnraum für die wachsende Weltbevölkerung und den begrenzt zur Verfügung stehenden Ressourcen ist die Verwendung von Bambus als erneuerbares Baumaterial sicherlich eine Überlegung wert.

Bei meinen weiteren Recherchen fand ich heraus, dass sich auch bereits Hochschulen mit dem Thema Bambus befasst hatten. So gibt es eine Medieninformation der Technischen Universität Darmstadt mit dem Thema „Bauen mit Bambus und Beton – TU-Wissenschaftler entwickeln tragfähigere Bambuskonstruktion“. Die Wissenschaftler hatten nach Möglichkeiten für ein stabiles Zusammenfügen von Bambusrohren geforscht. Die Erkenntnisse der Darmstädter Forscher für das stabile Zusammenfügen der einzelnen Bambusrohre wurden erstmals beim Bau des Deutsch-Chinesischen Hauses auf der Expo 2010 in Shanghai eingesetzt. Mit der neuen Technik wurden sämtliche Bambusrohre der zweigeschossigen selbsttragenden Konstruktion zusammengefügt.

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig Materialprüfanstalt (MPA) für das Bauwesen hat einen Beitrag zu Bambus mit dem Titel „Bambus als Vorbild für ultraleichte, dünnwandige stabförmige Betonhohlbauteile“ veröffentlicht. Die Wissenschaftler haben in einer Versuchsreihe Teilstücke mehrerer Bambusstangen mit Durchmessern von 8 bis 14 cm in zentrischen Druckversuchen bis zum Bruch belastet, um die grundsätzliche Versagensform zu untersuchen. Sie versuchen so, das Tragprinzip des Bambus auf den Beton zu übertragen.

Weiterhin habe ich ein Referat mit der Überschrift „Bambus und seine mechanische Eigenschaften“, das an der RWTH Aachen erstellt wurde, im Internet gefunden. Verschiedene Wissenschaftler haben die Material- und Festigkeitseigenschaften von Bambus untersucht und diese unter anderem mit den Eigenschaften von Bauholz und Baustahl verglichen.

Auch hat sich die FH Köln und die Deutsche Forschungsgemeinschaft - DFG - in Bonn in dem Zeitraum 01.1981 – 07.1983 mit einem Projekt mit dem Titel „Bambus und Bambusbeton, Bambus als Zuschlag- und Bewehrungsersatz“ mit der Thematik beschäftigt. Die Wissenschaftler hatten Bambus zerkleinert und Betone mit unterschiedlichen Bambusgehalten von 0 bis 90 Prozent hergestellt. Weiterhin wurden Betonplatten hergestellt, bei denen Bambus als Bewehrung in Form von Viertel- bzw. Halbstäben eingebettet wurden.

Im Hinblick auf eine nachhaltige und ökologische Bauweise stehen bei meinen weiteren Überlegungen die Reduzierung von Eigengewicht und ein optimaler Materialeinsatz, durch Verwendung von Bambus statt Betonstahl, im Vordergrund. Da das Raumgewicht von Bambus nur ca. 1/10 des Raumgewichts von Betonstahl beträgt, tausche ich den Betonstahl bei der Bauweise „Stahlbeton“ durch ganze vorbehandelte Bambusstäbe aus und nenne diesen neuen Verbundwerkstoff „Bambusbeton“.
Meine Idee geht nun dahin, dass ich mit Hilfe dieser Baustoffkombination eine preiswerte, einfache und dauerhafte Bauweise gefunden habe, die insbesondere auch in den Entwicklungsländern Anwendung finden kann. Bambus ist ein nachwachsender Rohstoff und kommt in großen Mengen in vielen Entwicklungsländern vor. Er lässt sich einfach be- und verarbeiten.

1.2 Literatur und Hilfsmittel

Im Internet suchte ich nach brauchbaren Hinweisen zu meiner Idee und zu Bambus im Allgemeinen. Am Ende meiner Arbeit habe ich die benutzten Quellen und die Literatur im Quellen- und Literaturverzeichnis zusammengestellt. Meine Eltern haben mir bei Problemen mit dem Bau der Prüfkörper und der Prüfvorrichtung Ratschläge und für die Verwendung der hierfür benötigten Maschinen eine Einweisung in die richtige Gerätebedienung gegeben. Die hierfür benötigten Geräte wurden mir von meinen Eltern und Bekannten zur Verfügung gestellt. Für die Materialbeschaffung bin ich zusammen mit meinem Vater etliche Male in verschiedenen Baumärkten gewesen. Weitere Hilfen und Hilfsmittel habe ich nicht benutzt. Die Erkenntnisse, die ich aus den Experimenten gewonnen habe, stellen meine eigenen Überlegungen und Erkenntnisse dar.

2 Hauptteil

2.1 Materialien und Methode

2.1.1 Bambus

Bambus ist die am schnellsten wachsende Pflanze der Welt und ist aufgrund seines schnellen Wachstums ein gut reproduzierbares Baumaterial. Er passt sich weltweit den unterschiedlichen ökologischen Bedingungen an. Der Bambusgürtel verläuft durch die tropischen bis gemäßigten Zonen rings um den Globus, von 46 Grad nördlicher bis 47 Grad südlicher Breite bis zu einer Höhe von 3500 Meter. Seine Hauptverbreitung liegt in tropischen Gebieten, vor allem in Südostasien. Er ist überwiegend auf sandigen Lehmböden bis lehmigen Tonböden zu finden und steht auch in sumpfigen Gebieten. Salzige Böden verträgt er allerdings nicht. Er hält Temperaturen zwischen -28°C und +50°C aus. Die Bambuspflanze lässt sich durch Teilen und Wiedereinsetzen des Wurzelnetzes (Rhizoms) oder durch Stecklinge vermehren.
Bambus kann man als ein außerordentliches Produkt der Natur bezeichnen, da er im Aufbau und seinen Eigenschaften denen eines hochmodernen High-Tech-Werkstoffes entspricht. Er ist stabil und dank seiner Hohlräume extrem leicht und elastisch. Bambus ist durch Trennwände versteift und durch seine physikalischen Eigenschaften ist er anderen Baustoffen überlegen. Er gehört zur Familie der Gräser und es gibt laut Literatur weltweit etwa 500 verschiedene Bambusfamilien mit teilweise hunderten von Unterarten.

Aus einem Samen entsteht zunächst ein Rhizom. Nach ungefähr 12 Jahren ist das Längen- und Dickenwachstum des Rhizoms abgeschlossen. Erst jetzt kann ein Rhizom Halme in voller Dicke hervorbringen. Die aus dem Rhizom herauswachsenden Bambushalme sind umso dicker, je besser das Rhizom entwickelt ist. Die allgemein als Bambus bezeichneten Halme der Bambuspflanze entwickeln sich als Knospen an der Wurzel, dem Rhizom, und wachsen dort über mehrere Jahre. Die Halme brechen dann in ihrem vollen Querschnitt als kurze, dicke Sprossen aus der Erde heraus. Das Wachstum eines Bambushalmes erfolgt ab diesem Zeitpunkt mit ungeheurer Geschwindigkeit. Innerhalb eines Zeitraumes von 20 bis 30 Tagen, spätestens aber innerhalb eines Jahres erreichen sie ihre volle Höhe. Je nach Art kann die Höhe von einigen Dezimetern bis zu 40 m bei einem Durchmesser von etwa 30 cm betragen. Die Entwicklung des Halms aus dem Rhizom ist bei allen Bambussen ähnlich. Typisch für Bambus ist, dass er kein Dickenwachstum aufweist. Anders als bei Bäumen, deren Kambiumschicht nicht nur ein Längen- sondern auch ein Dickenwachstum aufweisen. Das Alter eines Bambushalmes kann man demnach nicht wie beim Baum durch seinen Umfang bestimmen. Die Altersbestimmung ist aber anhand der Bambusoberfläche möglich.
Die Halme der meisten Bambusarten bleiben in der Mitte hohl. Die Hohlräume werden durch Knoten, Nodien, unterbrochen. Der Bambushalm wird so in seiner Längsachse in hohle Internodien und dazwischenliegende Nodien gegliedert. Die Halme verjüngen sich von der Wurzel bis zur Spitze

allmählich. Die Wandstärke des Halmes nimmt nach oben hin ab. Jedoch gibt es auch Bambusarten mit vollem Querschnitt und deutlich geringerem Durchmesser.

Die als Baumaterial interessanten Bambusarten lassen sich je nach Art des Wurzelnetzes (Rhizoms) in zwei Gruppen einteilen:

1. Monopodiale Bambuspflanzen mit weitverzweigtem horizontalem und dünnem, geradlinigem Wurzelnetz, aus dem einzelne Triebe sprießen.
2. Sympodiale Bambuspflanzen mit kurzem, dickem Wurzelnetz, das sich kreisförmig ausbreitet und aus deren Spitzen sich Halme entwickeln.

Innerhalb des Rohrquerschnittes gibt es eine Materialverdichtung von innen nach außen. Der Bambushalm besteht aus Knoten (Nodien), Kammern (Internodien) und Trennwänden (Diaphragmen). Der Halmdurchmesser variiert je nach Art von streichholzdünn bis rund 30 cm. Im Durchschnitt betragen die Halmlängen 8 bis 15 Meter bei einem Durchmesser von 5 bis 12 cm und 10 mm Wandstärke. Die Bambushalme sind mehrjährig. Etwa vom dritten Jahr an beginnt die Verholzung und Verkieselung der Halme, womit der Bambus an Stärke gewinnt und als tragendes Baumaterial interessant wird. Durch zunehmende Kieselsäureeinlagerung wird die Oberfläche des Bambus immer härter. Wegen des hohen Kieselsäuregehalts bzw. der harten Silikatschicht der Außenschicht ist Bambus sehr widerstandsfähig gegen äußere chemische, tierische und mechanische Einflüsse.

Bauphysikalische Eigenschaften von Bambus
Das durchschnittliche Bambus-Raumgewicht beträgt zwischen 0,70 – 0,80 kg/dm³.
Die folgenden Angaben zu den mechanischen Eigenschaften von Bambus entstammen einer wissenschaftlichen Arbeit der RWTH Aachen:

Mechanische Eigenschaften [N/mm²]	Bambus
E-Modul	20.000
Druckfestigkeit	62 - 93
Zugfestigkeit	148 - 364
Biegefestigkeit	76 - 276
Scherfestigkeit	20

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Bambus

Bei den Biege- bzw. Schub- und Zugversuchen wurde die Bruchgrenze ermittelt. Ein Vergleich mit den üblichen Baumaterialien ist schwierig, da die Versuche zur Festigkeit von Bambus nicht genormt sind.
Bambus gilt allgemein als ein sehr zug- und druckfestes Material. Die Festigkeiten sind jedoch von mehreren Faktoren, wie z. B. Wachstumsstandort, Zeit des Fällens, Alter des Halmes bei der Ernte, Feuchtigkeitsgehalt, abhängig. Weiterhin ist die Festigkeit der äußeren Bambushalmschicht größer als die der inneren. Grund für die leichte Längsspaltbarkeit ist der zur Halmlängsachse parallele Verlauf der Fasern. In der verkieselten äußersten Randschicht verlaufen axialparallel hochelastische Fasern mit einer Zugfestigkeit von teilweise bis zu 400 N/mm². Zum Vergleich können extrem starke Holzfasern nur bis zu 50 N/mm² Zug aufnehmen und Baustahl St37 im Extremfall 370 N/mm². Bambus ist brennbar, jedoch ist seine Entflammung und die Ausbreitung des Feuers verhältnismäßig träge. Ob und wie stark die Materialeigenschaften von der Bambusart abhängen, wurde scheinbar noch nicht vollständig untersucht.

Bambusfasern könnten auch als Bewehrung dem Beton zugegeben werden, ähnlich einer Stahlfaserbewehrung.

2.1.2 Beton

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch von Zement, fein- und grobkörnigem Betonzuschlag und Wasser – gegenenfalls auch mit Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen – durch Erhärten des Zementleims entsteht. Der Nennwert des Größtkorns für den Zuschlag muss mindestens 4 mm betragen, sonst liegt ein „Mörtel“ vor.

Je nach Trockenrohdichte unterscheidet man folgende Betone:

- Leichtbeton ($\rho \leq 2{,}0$ kg/dm³)
- Normalbeton (2,0 kg/dm³ > $\rho \leq 2{,}6$ kg/dm³)
- Schwerbeton ($\rho > 2{,}6$ kg/dm³).

Die Trockenrohdichte wird maßgeblich durch die Kornrohdichte des Zuschlags beeinflusst. Unter dem Begriff „Beton“ ist im Allgemeinen Normalbeton zu verstehen.

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel. Wird der Zement mit Wasser angemacht entsteht Zementleim, der durch Hydratation erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.

Betonzuschläge bestehen aus einem Gemenge von Körnern aus natürlichen (Granit, Kalkstein, Quarzit usw.) oder künstlichen (Hochofenschlacke, Ziegelsplitt usw.) mineralischen Stoffen. Die Körner können gebrochen oder ungebrochen sein. Die Korngrößen müssen für die Herstellung von genormtem Stahlbeton eine bestimmte Zusammensetzung aufweisen, d. h. zu einer definierten Sieblinie gehören.

Dem Beton können spezielle Zusätze beigegeben werden, um bestimmte Eigenschaften günstig zu beeinflussen. Es gibt Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel. Betonzusatzstoffe (z. B. faserartige Stoffe) werden in größerer Menge als die Betonzusatzmittel zugegeben und sind daher in der Betonzusammensetzung zu berücksichtigen.
Betonzusatzmittel (Betonverflüssiger, Verzögerer usw.) verändern durch chemische oder physikalische Wirkung die Verarbeitbarkeit, das Erstarrungsverhalten des Betons.

Damit der Beton verarbeitet werden und der Zement erhärten kann, ist Zugabewasser erforderlich. Dabei darf der Wassergehalt eine bestimmte Menge weder unter- noch überschreiten. Als Zugabewasser ist Trinkwasser geeignet.
Die wichtigste bautechnische Eigenschaft des Betons ist die hohe Druckfestigkeit. Es sind Druckfestigkeiten bis ca. 250 N/mm² erreichbar.

Die Zugfestigkeit des Betons ist wesentlich kleiner als die Druckfestigkeit und beträgt nur 5 bis 10 % der Druckfestigkeit. Außerdem ist die Streuung der Zugfestigkeit je nach Zuschlägen, Beanspruchungsart, Festigkeitsklasse des Betons wesentlich stärker als die der Druckfestigkeit.

2.1.3 Betonstahl

Man unterscheidet Betonstabstahl und Betonstahlmatten. Unter Betonstabstahl versteht man einzelne Stahlstäbe. Betonstahlmatten bestehen aus einem orthogonalen Raster von Stäben, die durch Punktschweißung verbunden werden. Betonstahl hat eine gerippte Oberfläche, um den Verbund zwischen dem Stahl und dem ihn umgebenden Beton zu verbessern. Betonstähle werden mit einer Buchstaben-Zahlen-Kombination bezeichnet. Die Kurzbezeichnung BSt 500S(B) bedeutet folgendes:

BSt (BetonStahl), 500 (β_S = 500 N/mm²), S (Stäbe), B (hochduktil). Betonstähle gibt es in den Nenndurchmessern von 6 mm bis 32 mm. Bedingt durch die Profilierung betragen die realen Durchmesser entsprechend 7 mm bis 39 mm.
Mit einem Raumgewicht von 7,85 kg/dm³ hat Betonstahl ungefähr ein 10-fach höheres Raumgewicht als Bambus.

2.1.4 Verbundwerkstoff Stahlbeton

Stahlbeton ist ein Baumaterial, bei dem der Baustoff Beton mit einer hohen Druck- und einer geringen Zugfestigkeit mit dem Werkstoff Betonstahl mit einer hohen Druck- und Zugfestigkeit zu einem neuen Verbundwerkstoff Stahlbeton vereinigt wird. Dem Beton wird dabei die Aufnahme von Druckspannungen, dem Betonstahl die Aufnahme von Zugspannungen zugewiesen. Durch die Profilierung des Betonstahls wird ein guter Verbund zwischen Beton und Stahl angestrebt. Damit entspricht die Dehnung des Betons in Höhe der Stahleinlagen weitgehend der Stahldehnung. Die Spannungen längs der Stabrichtung zwischen Betonstahl und Beton werden im Wesentlichen durch Formschluss über die Rippen übertragen. Die Adhäsionsspannungen (Adhäsion = anhaften) des Betons am Stahl sind im Vergleich dazu vernachlässigbar klein.

2.2 Vorgehensweise und Probleme

Unbehandelter Bambus nimmt bei Kontakt mit Wasser durch den Frischbeton dieses auf und quillt. Die Volumenzunahme bzw. das Aufquellen von Bambus könnte dann eventuell zu feinen Haarrissen im Beton führen. Durch diese Risse dringt Feuchtigkeit in das Betonbauteil ein und der unbehandelte Bambus könnte so geschädigt werden. Also wäre es besser, den Bambus einer Vorbehandlung zu unterziehen. Weiterhin besitzen die Bambusstäbe anders als der verwendete Betonstahl eine relativ glatte Oberfläche. Daher entschloss ich mich, die Oberfläche der Bambusstäbe mit einem Gemisch aus wasserfestem Leim und Quarzsand zu behandeln. Dazu führte ich zunächst noch einen Versuch durch. Ich nahm mir zwei etwa 18,5 cm lange Bambusstäbe und behandelte einen der Stäbe mit Leim und Quarzsand. An drei markierten Stellen wurde jeweils der Durchmesser der Stäbe mit einer digitalen Schieblehre gemessen. Danach legte ich beide Stäbe für ca. eine Stunde in ein Wasserbad und maß erneut die Durchmesser (Abbildung 2 und Tabelle 2).

Abbildung 2: Bambusstäbe im Wasserbad für 1. Messung
oben unbehandelt, unten behandelt
(Quelle: eigenes Foto)

Abbildung 3: Bambusstäbe im Wasserbad für 2. Messung
oben unbehandelt, Mitte behandelt mit Leim und Quarzsand, unten behandelt mit PUR-Kleber und Quarzsand
(Quelle: eigenes Foto)

Bambusstab	Durchmesser [mm]				Differenz Durchmesser im Mittel nass / trocken	Verhältnis Durchmesser nass / trocken
	linkes Stabende	Stabmitte	rechtes Stabende	im Mittel	[mm]	[—]
trocken unbehandelt	7,91	6,97	7,68	7,52	0,19	1,025
nass unbehandelt	8,18	7,16	7,80	7,71		
trocken mit wasser-festem Holzleim und Quarzsand behandelt	8,92	10,21	9,58	9,57	0,09	1,009
nass mit wasser-festem Holzleim und Quarzsand behandelt	9,01	10,32	9,66	9,66		

Tabelle 2: 1. Messung der Bambusstabdurchmesser im Vergleich trocken / nass

Da ich noch eine weitere Oberflächenbehandlung für die Bambusstäbe testen wollte, wiederholte ich den vorherigen Versuch nochmals. Jetzt allerdings mit drei Bambusstäben, wovon ich einen wieder mit wasserfestem Leim und Quarzsand und einen anderen mit wasserfestem PUR-Kleber und Quarzsand behandelte. Den dritten Stab ließ ich bei dem Experiment unbehandelt (Abbildung 3 und Tabelle 3).

Bambusstab	Durchmesser [mm]				Differenz Durchmesser im Mittel nass / trocken	Verhältnis Durchmesser nass / trocken
	linkes Stabende	Stabmitte	rechtes Stabende	im Mittel	[mm]	[—]
trocken unbehandelt	8,70	8,61	8,15	8,49	0,07	1,008
nass unbehandelt	8,79	8,69	8,20	8,56		
trocken mit wasser-festem Holzleim und Quarzsand behandelt	9,69	10,98	10,66	10,44	0,03	1,003
nass mit wasser-festem Holzleim und Quarzsand behandelt	9,70	11,03	10,67	10,47		
trocken mit PUR-Kleber und Quarzsand behandelt	11,15	9,50	10,41	10,35	0,44	1,043
nass mit PUR-Kleber und Quarzsand behandelt	11,39	10,06	10,91	10,79		

Tabelle 3: 2.Messung der Bambusstabdurchmesser im Vergleich trocken / nass

Man erkennt, dass bei beiden Versuchen durch die Vorbehandlung der Bambusstäbe mit wasserfestem Holzleim und Quarzsand die Volumenzunahme bei Kontakt mit Wasser reduziert wird.

Insofern dürfte das Rissrisiko ebenfalls geringer sein. Allerdings ist die Volumenzunahme wegen der kleineren Masse bei diesen Durchmessern ohnehin geringer als bei größeren Bambusstabdurchmessern. Die Vorbehandlung der Bambusoberfläche mit PUR-Kleber ist nicht effektiv, da der Kleber aufschäumt, Poren bildet und damit Wasser aufnimmt.

Nun musste ich mir überlegen, wie ich die Tragfähigkeit meines Bambusbetons annähernd ermitteln und mit dem üblichen Stahlbeton vergleichen kann. Die Probekörper durften nicht zu groß und natürlich auch nicht zu schwer werden, da ich sie tragen und transportieren muss.
Ich baute zunächst zwei Holzschalungen mit den lichten Abmessungen Länge x Breite x Höhe = 68 cm x 12 cm x 5,5 cm. Jeweils an den Kopfenden bohrte ich zwei 10 mm starke Löcher, durch die ich die Bambusstangen und Betonstähle durchschieben konnte. Die benötigten Bambusstangen habe ich in einem örtlichen Baumarkt gekauft. Folgende Bambusstangen waren dort z. B. erhältlich:

Durchmesser [mm]	Länge [cm]
6 - 8	90
8 – 10	120
10 – 12	150
12 – 14	180
18 - 20	210
20 - 22	240
30	180

Tabelle 4: Beispiele verschiedener Bambusdurchmesser

Es sind aber durchaus auch Bambusstangen zwischen 3 m und 6 m im Handel zu bekommen. Für meine Versuche habe ich die 6 bis 8 mm starken Bambusstangen verwendet. Den notwendigen Betonstahl und Beton kaufte ich bei einem Baustoffhändler. Den 6 (7) mm starken Betonstahl habe ich jeweils auf Meterstücke mit einem Bolzenschneider geschnitten. Nun präparierte ich noch die Bambusstäbe, indem ich sie mit wasserfestem Leim und Quarzsand behandelte. Mit meiner Vorbehandlung der Bambusstäbe konnte ich etwas für die bessere Verbundwirkung von Bambusstab und Beton tun und außerdem der Wasseraufnahme beim Betoniervorgang entgegenwirken (Abbildung 4 und 5). Als Beton verwendete ich von der Firma Sakret den Beton-Estrich zur Verwendung als Beton C25/30 mit einer Korngröße von 0 – 8 mm.

Abbildung 4: Zusammenbau der Schalung für den Bambus-betonbalken (Quelle: eigenes Foto)

Abbildung 5: Zusammenbau der Schalung für den Stahl-betonbalken (Quelle: eigenes Foto)

Vor dem Betonieren legte ich jeweils noch einen Abstandhalter mit einer Höhe von 2 cm in die Schalungen unter die Stäbe, damit beim Betonieren die Stäbe auf einer bestimmten Höhe verbleiben. Zuletzt wässerte ich noch die beiden Holzschalungen, damit das Holz nicht dem Beton das Anmachwasser entzieht. Jetzt konnte ich die beiden Probekörper betonieren (Abbildung 6 und 7).

Abbildung 6: Betonieren der Betonbalken 1 und 2
(Quelle: eigenes Foto)

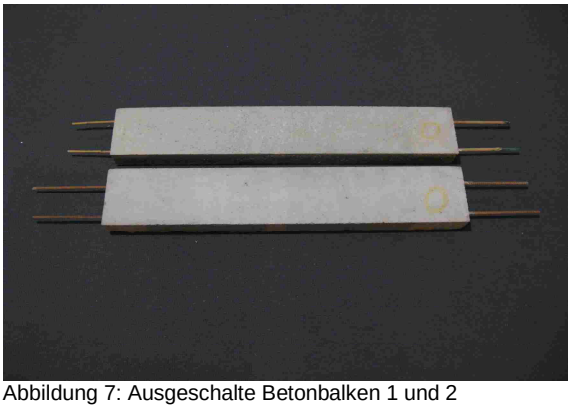
Abbildung 7: Ausgeschalte Betonbalken 1 und 2
(Quelle: eigenes Foto)

Beim Ausschalen nach einer Woche stellte ich dann aber fest, dass die Probekörper vielleicht doch etwas unhandlich sind und dass ich wahrscheilich eine viel zu große Last benötige, um ihre Tragfähigkeit bis zum Bruch zu prüfen. Ich entschloss mich daher, mit kleineren Probekörpern weiter zu arbeiten. Ich baute nun zwei Holzschalungen mit den lichten Abmessungen Länge x Breite x Höhe = 87 cm x 6 cm x 5 cm. Jeweils an den Kopfenden bohrte ich ein 10 mm starkes Loch, durch das ich die Bambusstange und den 6 (7) mm starken Betonstahl durchschieben konnte (Abbildung 8 und 9). Der weitere Ablauf war der gleiche wie schon bei den bereits betonierten Betonbalken. Insgesamt fertigte ich von diesen Probekörpern jeweils drei Exemplare an. Zusätzlich betonierte ich noch einen Betonbalken ohne jegliche Bewehrung.

Abbildung 8: Holzschalung für die Betonbalken 3 bis 9
(Quelle: eigenes Foto)

Abbildung 9: Betonierte Betonbalken in der Schalung
(Quelle: eigenes Foto)

Betonbalken	Abmessungen [cm]	Bewehrung	Betoniertag	Ausschaltag	Prüfungstag
1	68 x 12 x 5,5	Bambus	04.12.2017	11.12.2017	12.01.2018
2	68 x 12 x 5,5	Betonstahl	04.12.2017	11.12.2017	12.01.2018
3	87 x 6 x 5	Bambus	11.12.2017	17.12.2017	12.01.2018
4	87 x 6 x 5	Betonstahl	11.12.2017	17.12.2017	12.01.2018
5	87 x 6 x 5	Bambus	17.12.2017	23.12.2017	12.01.2018
6	87 x 6 x 5	Betonstahl	17.12.2017	23.12.2017	12.01.2018
7	87 x 6 x 5	Bambus	29.12.2017	07.01.2018	12.01.2018
8	87 x 6 x 5	Betonstahl	29.12.2017	07.01.2018	12.01.2018
9	87 x 6 x 5	—	23.12.2017	29.12.2017	12.01.2018

Tabelle 5: Aufstellung der hergestellten Prüfkörper

Die Lagerbedingungen aller hergestellten Probekörper bis zu ihrer Prüfung waren absolut gleich. Die Lagerung erfolgte bei normalem Raumklima (ca. 16°C und 50 % Luftfeuchtigkeit). Nach einer Woche wurden die Körper ausgeschalt und blieben bis zur Prüfung unter oben beschrieben Bedingungen.

2.3 Versuche und Auswertung

Um die Tragfähigkeit der hergestellten Betonbalken zu testen, baute ich mir folgende Prüfeinrichtung. Zunächst besorgte ich mir eine 40 mm starke Holzplatte mit den Abmessungen 100 cm x 40 cm. Unter die Holzplatte schraubte ich an den langen Seitenrändern jeweils ein Holz mit den Abmessungen von 53 mm x 53 mm, da ich die Drehdornpresse nach unten noch mit M12-Gewindestangen mit Muttern und Unterlegscheiben verankern musste. Auf dieser Platte montierte ich nun mittig die Drehdornpresse. Mit einer Radlastwaage versuche ich die Last, die auf den Probekörpern wirkt, einigermaßen genau zu bestimmen. Zwischen dem Dorn der Presse und der Radlastwaage lege ich ein 24 mm starkes Hartholzstück mit den Abmessungen 7 cm x 25 cm, damit die Punktspannung auf der Radlastwaage nicht zu groß wird. Damit die beiden Sensoren der Radlastwaage möglichst plan aufliegen und somit genau messen, lege ich unter der Waage eine 5 mm starke mitteldichte Faserplatte (MDF-Platte). Die Lastsensoren der Radlastwaage haben einen Achsabstand von 135 mm. Mit der Drehdornpresse kann ich eine maximale Last von 1 t erzeugen. Auf die Radlastwaage kann nach Herstellerangaben eine maximale Punktlast von 450 kg aufgebracht werden. Die Lastabweichung soll bei sorgfältiger Handhabung unter 3 % liegen. Die Betonbalken liegen während der Lastprüfung auf jeweils einem Holzbalken mit den Abmessungen von 74 mm x 74 mm mit einer Auflagerlänge von ca. 4,5 cm auf. Bei einer angenommen maximalen mittigen Last von 450 kg auf den Betonbalken muss jeder Auflagerpunkt mindestens 225 kg aufnehmen. Unter Berücksichtigung, dass sich das Auflagerholz nicht eindrücken sollte, ist eine maximale Auflagerspannung für das Auflagerholz (Druck senkrecht zur Faser) von 20 kg/cm² möglich. Bei 225 kg Auflagerlast bekomme ich einen Auflagerdruck von 225 kg/(7,4 cm x 4,5 cm) = 6,76 kg/cm². Das wäre so in Ordnung. Damit sich der Betonbalken während der Belastung an den Auflagern nicht verdreht, werden seitlich an den Betonbalken zwei Hölzer auf das Auflagerholz geschraubt, ähnlich wie bei einer Gabellagerung (Abbildung 10). Bei den ersten Vorversuchen bewegten sich die nicht fixierten 74 mm x 74 mm Auflagerhölzer schon bei einer geringen Belastung horizontal nach außen. Deshalb schraubte ich am Rand der Grundplatte jeweils noch eine Latte mit den Abmessungen 400 mm x 36 mm x 17 mm auf. Da ich neben der Ermittlung der jeweiligen Bruchlast auch die entsprechende Verformung feststellen möchte, habe ich für die weiteren Messungen eine Halterung zur Aufnahme einer Risskarte bzw. eines Tiefenmessers gebastelt.

Abbildung 10: Versuchsaufbau für Belastungsprüfung der Betonbalken (Quelle: eigenes Foto)

Abbildung 11: Radlastwaage und Drehdornpresse (Quelle: eigenes Foto)

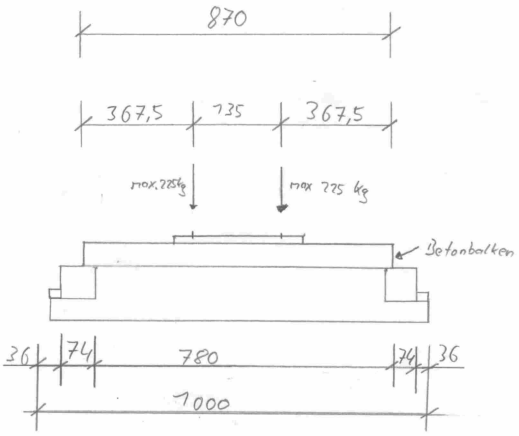

Abbildung 12: Belastungsskizze der Betonbalken

2.3.1 Versuche mit den Betonbalken

2.3.1.1 Prüfung der Betonbalken 1 und 2 und Auswertung

Zunächst baute ich meine selbstgebaute Prüfeinrichtung auf meiner Werkbank auf. Danach belastete ich mit der Drehdornpresse langsam und schrittweise nacheinander die Betonbalken 1 und 2 bis zum Bruch. Die Ergebnisse der Belastungsprüfung sind in nachstehender Tabelle 6 zusammengestellt.

Betonbalken 1 (siehe Tabelle 5)				Betonbalken 2 (siehe Tabelle 5)		
Prüfung	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]
12.01.2018	30-40	33	—	30-40	32	—
	40-50	42	—	40-50	40	—
	50-60	51	—	50-60	50	—
	60-70	64	—	60-70	60	—
	70-80	71	—	70-80	70	—
	80-90	80	—	80-90	82	—
	90-100	91	—	90-100	90	—
	100-110	103	—	100-110	100	—
	110-120	115	—	110-120	115	—
	120-130	120	—	120-130	121	—
	130-140	132	—	130-140	132	—
	140-150	144	—	140-150	142	—
	150-160	151	157	150-160	151	—
	—	—	—	160-170	160	—
	—	—	—	170-180	172	—
	—	—	—	180-190	181	—
	—	—	—	190-200	190	—
	—	—	—	200-250	245	—
	—	—	—	250-300	298	—
	—	—	—	300-340	335	—
	—	—	—	340-450	405	405

Tabelle 6: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 1 und 2

Bei den Bruchlasten der beiden Betonbalken 1 und 2 erkennt man, dass der Betonbalken mit einer Betonstahlbewehrung eine ca. 2,5-fache höhere Bruchlast hat als der Betonbalken mit der Bambusbewehrung. Dies steht sicherlich im Zusammenhang mit der höheren Zugfestigkeit von Betonstahl. Die Fließgrenze beträgt 500 N/mm² und die Zugfestigkeit 550 N/mm² für Betonstahl gegenüber Bambus laut Tabelle 1 mit 148 N/mm² bis 364 N/mm². Eine Annäherung der Bruchlasten von Stahl- und Bambusbeton wäre sicherlich über eine Erhöhung der Bambusbewehrung möglich.

2.3.1.2 Prüfung der Betonbalken 3 bis 9 und Auswertung

Zunächst baute ich wieder meine selbstgebaute Prüfeinrichtung auf meiner Werkbank auf. Die Durchführung der Belastung erfolgte wie schon bei den Betonbalken 1 und 2. Die Ergebnisse der Belastungsprüfung sind in den nachstehenden Tabellen 7 bis 11 zusammengestellt.

Betonbalken 3 (siehe Tabelle 5)				Betonbalken 4 (siehe Tabelle 5)		
Prüfung	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]
12.01.2018	30-40	34	—	30-40	32	—
	40-50	40	—	40-50	41	—
	50-60	51	—	50-60	50	—
	60-70	60	64	60-70	61	—
	70-80	70	—	70-80	70	—
	80-90	80	—	80-90	80	—
	90-100	91	—	90-100	90	—
	100-110	103	—	100-110	101	—
	110-120	115	—	110-120	110	—
	120-130	120	—	120-130	120	—
	130-140	132	—	130-140	130	—
	140-150	144	—	140-150	142	142
	150-160	—	—	150-160	—	—
	160-170	—	—	160-170	—	—

Tabelle 7: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 3 und 4

Betonbalken 5 (siehe Tabelle 5)				Betonbalken 6 (siehe Tabelle 5)		
Prüfung	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]
12.01.2018	30-40	33	—	30-40	39	—
	40-50	42	—	40-50	42	—
	50-60	50	59	50-60	51	—
	60-70	—	—	60-70	60	—
	70-80	—	—	70-80	72	—
	80-90	—	—	80-90	80	—
	90-100	—	—	90-100	100	—
	100-110	—	—	100-110	105	—
	110-120	—	—	110-120	111	—
	120-130	—	—	120-130	122	122
	130-140	—	—	130-140	132	—
	140-150	—	—	140-150	142	—
	150-160	—	—	150-160	151	—
	160-170	—	—	160-170	160	—

Tabelle 8: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 5 und 6

Betonbalken 7 (siehe Tabelle 5)				Betonbalken 8 (siehe Tabelle 5)		
Prüfung	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]
12.01.2018	30-40	31	—	30-40	32	—
	40-50	46	—	40-50	41	—
	50-60	57	57	50-60	50	—
	60-70	—	—	60-70	61	—
	70-80	—	—	70-80	70	—
	80-90	—	—	80-90	80	—
	90-100	—	—	90-100	90	—
	100-110	—	—	100-110	101	—
	110-120	—	—	110-120	111	—
	120-130	—	—	120-130	120	—
	130-140	—	—	130-140	130	—
	140-150	—	—	140-150	140	—
	150-160	—	—	150-160	150	150
	160-170	—	—	160-170	—	—

Tabelle 9: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 7 und 8

Arithmetrisches Mittel der Bruchlasten der Betonbalken 3 bis 8	
Betonbalken	Bruchlast [kg]
Bambusbeton	60
Stahlbeton	138

Tabelle 10: Arithmetrisches Mittel der Bruchlasten der Betonbalken 3 bis 8

Auch bei den Bruchlasten der Betonbalken 3 bis 8 erkennt man, dass die Betonbalken mit einer Betonstahlbewehrung eine ca. 2,5-fache höhere Bruchlast haben als die Betonbalken mit Bambusbewehrung. Eine Annäherung der Bruchlasten von Stahl- und Bambusbeton wäre sicherlich auch hier über eine Erhöhung der Bambusbewehrung möglich.

Betonbalken 9 (siehe Tabelle 5)			
Prüfung	Lastbereich [kg]	Belastung [kg]	Bruchlast [kg]
12.01.2018	30-40	32	—
	40-50	41	41
	50-60	—	—
	60-70	—	—
	70-80	—	—
	80-90	—	—
	90-100	—	—
	100-110	—	—
	110-120	—	—
	120-130	—	—
	130-140	—	—
	140-150	—	—
	150-160	—	—
	160-170	—	—

Tabelle 11: Auswertung des Belastungsversuchs für den Betonbalken 9

Beim Betonbalken 9 wurde keine Bewehrung eingebaut. Trotzdem ging der Balken erst bei einer Last von 41 kg zu Bruch.

2.4 Diskussion: Vor- und Nachteile von Bambus und Bambusbeton als Baustoff

Vorteile:

- Bambus ist in vielen Entwicklungsländern einfach zugänglich.
- Er hat eine geringe Umweltbelastung.
- Er hat geringe Produktions- und Transportkosten.
- Er hat ein geringes Gewicht.
- Bambus bzw. Bambusbeton ist korrosionsbeständig.
- Bambus hat eine hohe Zugfestigkeit.
- Er ist ein nachwachsender Baustoff.
- Er nimmt große Mengen CO_2 aus der Atmosphäre auf.

Nachteile:

- Beton und Bambus haben unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten.
- Unbehandelter Bambus nimmt in Verbindung mit Frischbeton Feuchtigkeit auf und beginnt zu quellen.
- Da Bambus nicht die Zugfestigkeit von Betonstahl erreicht, ist bei gleicher Bruchlast eine höhere Anzahl von Bambusstäben erforderlich.
- Die Verbundwirkung von Bambus und Beton ist schlechter als bei Betonstahl und Beton.

Ein bewusster und umweltverträglicher Umgang mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen ist bei der Herstellung von Materialien wie auch bei der Nutzung von Energie wichtiger denn je. Dabei spielen nachwachsende Rohstoffe eine immer bedeutendere Rolle.

3 Schluss

3.1 Fazit

1. Die Ergebnisse der bisherigen Versuche zur Tragfähigkeit von Bambusbeton geben mir Mut, weiter Experimente mit diesem Baustoff durchzuführen. Die ermittelten Bruchlasten zeigen, dass man tragende Bauteile mit Bambusbeton herstellen kann. Um annähernd die gleiche Bruchlast wie beim Betonstahl zu erhalten, müsste man auf jeden Fall die Anzahl der Bewehrungsstäbe erhöhen und die Verbundwirkung zwischen Bambus und Beton noch verbessern. Gegebenenfalls wäre eine Erhöhung der Bruchlast auch mit einer zusätzlichen Faserbewehrung noch möglich. Diese Verbesserungen bzw. Varianten werde ich bis zum Regionalwettbewerb in Bonn noch erarbeiten.

2. Die verwendeten Bambusstäbe mit dem Durchmesser von 6 bis 8 mm scheinen für die Praxis nicht besonders geeignet zu sein, da sie auf der Länge von 90 cm doch sehr im Durchmesser variieren und der Durchmesser im Mittel weniger als 6 mm beträgt. Dies hat sich bei den Versuchen sicherlich auch negativ ausgewirkt. Bei den weiteren Experimenten werde ich deshalb den nächst größeren Durchmesser verwenden.

3. Das sichere Tragverhalten der Bambusbetonbauweise muss durch viele weitere Versuche noch ausreichend erforscht werden. Hierfür sind weitere umfangreiche Forschungsarbeiten notwendig. Erst dann könnte diese Bauweise für die Praxis zugelassen werden.

3.2 Ausblick

Da es sicher immer noch Verbesserungsmöglichkeiten gibt, werde ich weiter experimentieren und darüber nachdenken, wie die Bambusbetonbauweise optimiert werden und eine praktische Awendung finden kann, um auch in der Praxis als umweltfreundliche und wirtschaftliche Alternative zu den herkömmlichen Materialien eingesetzt werden zu können. Anlässlich des Regionalwettbewerbs in Bonn am 16.02.2018 würde ich im Fall einer Einladung weitere Versuche mit Bambusstäben für eine praktische Anwendung vorstellen wollen. Bis zur Präsentation versuche ich die Bauweise Bambusbeton für die Praxis zu optimieren.

3.3 Persönliche Erkenntnisse

Es war sehr spannend, selber einmal mit Erkenntnissen aus der Natur im Bereich der Technik zu arbeiten. Die Experimente haben mir sehr viel Spaß gemacht, weil das Erforschen und Erproben von natürlichen Baustoffen ein für mich sehr interessanter Bereich ist. Ich habe allerdings auch wieder festgestellt, dass es von einer Idee bis zur sinnvollen und effektiven Umsetzung ein langer Prozess ist, der immer noch verbessert und überarbeitet werden muss. Daneben musste ich feststellen, dass es notwendig ist, sehr präzise zu arbeiten, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, da zum Beispiel schon kleinste Abweichungen bei der Höhenlage der Bewehrung und der Herstellung und Nachbehandlung des Betons zu weit gestreuten Ergebnissen führen.

4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Probekörper für Tragfähigkeitsbestimmung…… 1
Abbildung 2 : Bambusstäbe im Wasserbad für 1. Messung…….. 8
Abbildung 3 : Bambusstäbe im Wasserbad für 2. Messung……..... 8
Abbildung 4 : Zusammenbau der Schalung für den Bambusbetonbalken…… 10
Abbildung 5 : Zusammenbau der Schalung für den Stahlbetonbalken…….. 10
Abbildung 6 : Betonieren der Betonbalken 1 und 2…… 11
Abbildung 7 : Ausgeschalte Betonbalken 1 und 2……..... 11
Abbildung 8 : Holzschalung für die Betonbalken 3 bis 9…… 11
Abbildung 9 : Betonierte Betonbalken in der Schalung…….. 11
Abbildung 10 : Versuchsaufbau für Belastungsprüfung der Betonbalken…… 12
Abbildung 11 : Radlastwaage und Drehdornpresse……..... 12
Abbildung 12 : Belastungsskizze der Betonbalken……..... 13

5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Bambus…… 6
Tabelle 2: 1. Messung der Bambusstabdurchmesser im Vergleich trocken / nass…..... 9
Tabelle 3: 2. Messung der Bambusstabdurchmesser im Vergleich trocken / nass…….. 9
Tabelle 4: Beispiele verschiedener Bambusdurchmesser…..... 10
Tabelle 5: Aufstellung der hergestellten Prüfkörper…..... 11
Tabelle 6: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 1 und 2…..... 13
Tabelle 7: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 3 und 4…..... 14
Tabelle 8: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 5 und 6…..... 15
Tabelle 9: Auswertung der Belastungsversuche für die Betonbalken 7 und 8…..... 15
Tabelle 10: Arithmetrisches Mittel der Bruchlasten der Betonbalken 3 bis 8…..... 16
Tabelle 11: Auswertung des Belastungsversuchs für den Betonbalken 9…..... 16

6 Quellen- und Literaturverzeichnis

Bücher:

[1] Avak, Ralf, Univ.-Prof. Dr.-Ing.: Stahlbetonbau in Beispielen DIN 1045 Teil 1, 5. Auflage, Cottbus / Biberach an der Riss 2007

[2] Wommelsdorf, Otto, Prof. Dr.-Ing.: Stahlbetonbau Bemessung und Konstruktion Teil 1, 9. Auflage, Oer-Erkenschwick 2007

Zeitschriftenartikel und Aufsätze:

Keine

Internetseiten:

[3] http://www.bambus.rwth-aachen.de/de/PDF-Files/Bambus%20als%20Baumaterial%20-%20Version%203.pdf: 23.10.2017, RWTH Aachen, Bambus als Baumaterial

[4] http://www.bambus.rwth-aachen.de/de/PDF-Files/Mechanische%20Eigenschaften%20von%20Bambus%20-%20%20Version%202.pdf: 23.10.2017, RWTH Aachen, Bambus und seine mechanischen Eigenschaften
http://www.forum-holzbau.com/pdf/schaur_00.pdf: 24.10.2017, Prof. Dr. Ing. Eda Schaur, Lehrstuhl für Konstruktion und Gestaltung an der Universität Innsbruck, Bambus – Baumaterial der Zukunft ?

http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports/KaF-2012-06.pdf: 24.10.2017, Martin Empelmann und Patricia Sawicki, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig Materialprüfanstalt (MPA) für das Bauwesen, Bambus als Vorbild für ultraleichte, dünnwandige stabförmige Betonhohlbauteile

http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung/baufolit/projekt/Bambus-und-Bambusbeton/68048450157: 25.10.2017, Fraunhofer IRB, FH Koeln Laboratorium fuer Bau- und Werkstoffpruefungen (Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. J. L. Atrops und Prof. Dr.-Ing. S. Haerig) und Deutsche Forschungsgemeinschaft –DFG-, Bonn (Förderer), Bambus und Bambusbeton. Bambus als Zuschlag- und Bewehrungsersatz

http://www.staring-le.de/vortraege/Bambus.pdf: 31.12.2017, Prof. Pahl / U. R. Richter, Universität Leipzig, Entwerfen und Konstruktives Gestalten, Ein klassischer Baustoff mit Zukunft: Bambus

http://www.tu-darmstadt.de/media/illustrationen/referat_kommunikation/pressemeldungen/2011_3/07-2011-Bambus_und_Beton.pdf: 25.10.2017, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht und Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider, Technische Universität Darmstadt, Bauen mit Bambus und Beton

http://www.wirtz.architektur.uni-siegen.de/wp-content/uploads/2015/Neue%20Wege%20im%20Betonbau.pdf: 25.10.2017, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Sibille Wirtz, Universität Siegen, Neue Wege im Betonbau