jugend forscht

Wettbewerb 2019

Jugend forscht

Projektbericht

Mit welchen einfachen Maßnahmen lässt sich eine Konstruktion aus Bambusbeton noch tragfähiger herstellen?

Vorname:	David
Nachname:	Mohr
Geschlecht:	männlich
Stufe:	EF
Schulanschrift:	Städt. St. Michael-Gymnasium Markt 11 53902 Bad Münstereifel
Privatanschrift:	Selmenstraße 3 53881 Euskirchen

Regierungsbezirk der Schule: Köln

Kurzfassung

Da Bambus ein nachwachsender Rohstoff mit einigen besonderen Eigenschaften ist, welche ihm eine hohe Stabilität verleihen und vor dem Hintergrund des drohenden Klimawandels, möchte ich noch intensiver an meinem Projekt aus dem letzten Jahr forschen.

Bei meinem Jugend forscht Projekt „Wie stabil ist eine Konstruktion aus Bambus und Beton?“ aus dem letzten Jahr sind scheinbar noch einige Fragen offen geblieben, die ich nun versuchen werde zu klären. Zum einen arbeite ich daran, den Elastizitätsmodul bzw. die Biegesteifigkeit der eingesetzten Bambusstäbe mit einfachen und kostengünstigen Maßnahmen entscheidend zu vergrößern und zum anderen sollten die Verbundspannungen, die zwischen den Bambusstäben und dem Beton vorhanden sind, optimiert werden. Mit einer erfolgreichen Umsetzung dieser Punkte könnte die ohnehin schon gute Tragfähigkeit der Bambusbetonmatrix noch gesteigert werden.

Da ich den Zeit- und Materialaufwand minimieren wollte, habe ich nach einer entsprechenden Lösung gesucht, um nicht von allen Versuchsreihen Betonbalken anfertigen zu müssen.
Bei meiner aktuellen Arbeit habe ich daher zunächst eine weitere Prüfeinrichtung konstruiert und gebaut, damit man vor der Herstellung von Prüfbalken bereits den Elastizitätsmodul bzw. die Biegesteifigkeit der einzelnen Bewehrungsstäbe auf einfache Art und relativ genau abschätzen bzw. ermitteln kann.

Neben der Verbesserung der Bambusstäbe werde ich ebenfalls versuchen, die Biegezugfestigkeit des Betons mit Hilfe von Zusatzstoffen noch zu optimieren.

Wenn diese Versuche abgeschlossen sind, werde ich bei weiteren Versuchen wieder Betonbalken mit verschiedenen ausgewählten Bewehrungsstäben herstellen und diese einer Lastprobe mit Hilfe einer selbstgebauten Prüfeinrichtung mit Drehdornpresse und einer Radlastwaage unterziehen.

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 weiter intensiv 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 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…… 4

2 Hauptteil…… 5

2.1 Materialien und Methode…… 5

2.1.1 Bambus…… 5

2.1.2 Beton…… 6

2.1.3 Betonstahl…… 7

2.1.4 Glasfaser…… 7

2.1.5 Verbundwerkstoff Stahlbeton und Bambusbeton…… 7

2.2 Vorgehensweise und Probleme…… 7

2.3 Versuche und Auswertung…… 13

2.3.1 Elastizitätsmodul und Biegesteifigkeit…… 14

2.3.2 Tragfähigkeit der Betonbalken…… 16

2.3.3 Versuche mit den Bewehrungsstäben…… 17

2.3.4 Versuche mit den Betonbalken…… 17

2.4 Diskussion: Vor- und Nachteile von Bambus und Bambusbeton als Baustoff.. 18

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

Da Bambus ein nachwachsender Rohstoff mit einigen besonderen Eigenschaften ist, welche ihm eine hohe Stabilität verleihen und vor dem Hintergrund des drohenden Klimawandels, möchte ich noch intensiver an meinem Projekt aus dem letzten Jahr forschen.
Bei meinem Jugend forscht Projekt „Wie stabil ist eine Konstruktion aus Bambus und Beton?“ aus dem letzten Jahr sind scheinbar noch einige Fragen offen geblieben, die ich nun versuchen werde zu klären. Zum einen arbeite ich daran, den Elastizitätsmodul bzw. die Biegesteifigkeit der eingesetzten Bambusstäbe mit einfachen und kostengünstigen Maßnahmen entscheidend zu vergrößern und zum anderen müssten die Verbundspannungen, die zwischen den Bambusstäben und dem Beton vorhanden sind, weiter optimiert werden. Mit einer erfolgreichen Umsetzung dieser Punkte könnte die ohnehin schon gute Tragfähigkeit der Bambusbetonmatrix noch gesteigert werden.
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.
Wie schon bei meinem letzten Bericht erläutert, haben sich auch bereits Hochschulen mit dem Thema Bambus befasst. 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. 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 gibt es ein Referat mit der Überschrift „Bambus und seine mechanische Eigenschaften“, das an der RWTH Aachen erstellt wurde. 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 weiteren 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 wieder bei Problemen mit dem Bau der Prüfkörper und der neuen 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 öfter 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

Die Materialien und Methode werden zum besseren Verständnis an dieser Stelle noch einmal kurz beschrieben bzw. wiederholt.

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.

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

Bauphysikalische Eigenschaften von Bambus

Das durchschnittliche Bambus-Raumgewicht beträgt zwischen 0,70 – 0,80 kg/dm³.
Die nebenstehenden Angaben in der Tabelle 1 zu den mechanischen Eigenschaften von Bambus entstammen einer wissenschaftlichen Arbeit der RWTH Aachen [5]:

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 Glasfaser- oder Stahlfaserbewehrung.

2.1.2 Beton

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch von Zement, fein- und grobkörnigem Betonzuschlag und Wasser – gegebenenfalls 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 (Reaktion zwischen den Hauptbestandteilen des Zements und dem Anmachwasser) 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 [1]. 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 Glasfaser

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden zur Profilierung der Bambusstäbe AR-Glasfaser-Rovings und als Betonzusatzstoff AR-Glasfasern mit einer Länge von 6 mm und 12 mm verwendet. Die AR-Kurzfasern wurden zur Verbesserung der Biegezug- und Zugfestigkeit des Betons verwendet. AR-Glasfasern besitzen eine Zugfestigkeit am Glasfaserbündel von 1.500 N/mm² und haben einen E-Modul von 75.000 N/mm² [13].

2.1.5 Verbundwerkstoff Stahlbeton und Bambusbeton

Stahl- und Bambusbeton ist ein Baumaterial, bei dem der Baustoff Beton mit einer hohen Druck- und einer geringen Zugfestigkeit mit dem Werkstoff Betonstahl oder Bambus mit einer hohen Druck- und Zugfestigkeit zu einem neuen Verbundwerkstoff Stahlbeton bzw. Bambusbeton vereinigt wird. Dem Beton wird dabei die Aufnahme von Druckspannungen, dem Betonstahl bzw. Bambus 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. Bei meinem Vorgängerprojekt entschloss ich mich daher, die Oberfläche der Bambusstäbe mit einem Gemisch aus wasserfestem Leim und Quarzsand zu behandeln. Dazu führte ich vorab verschiedene Versuche mit wasserfestem Holzleim und Quarzsand sowie mit PUR-Kleber in Verbindung mit Quarzsand durch, die in meinem Projektbericht aus dem Vorjahr ausführlich beschrieben sind und hier nicht wiederholt werden müssen.

Meine Erkenntnis aus diesen Versuchen war, dass bei beiden Versuchen durch die Vorbehandlung der Bambusstäbe mit wasserfestem Holzleim und Quarzsand die Volumenzunahme bei Kontakt mit Wasser um ca. 50% reduziert wird. Insofern dürfte das Rissrisiko ebenfalls entsprechend 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.

Bei meinen aktuellen Versuchen mit Bambus zur Wasseraufnahme konnte ich auf die Ergebnisse von meinem letzten Projekt zurückgreifen und habe die Oberflächenbehandlung der Bambusstäbe nun mit Epoxidharz in Verbindung mit Quarzsand und Zement durchgeführt. Hiervon verspreche ich mir noch einen effektiveren Schutz der Bambusstäbe und eine größere Festigkeit.

Bei der Auswertung meiner zahlreichen Versuche mit den Betonbalken im Vorjahr musste ich feststellen, dass die mit einer Bambusbewehrung hergestellten Prüfbalken eine deutlich höhere Verformung bei Belastung zeigen als die Balken mit einer Betonstahlbewehrung. Da der Beton bei beiden Bewehrungsarten der gleiche war, kann dies nur mit der Steifigkeit bzw. dem Elastizitätsmodul der verwendeten Bewehrung und der Verbundwirkung von Bewehrung und Beton zusammenhängen. Laut Literatur besitzt Betonstahl einen Elastizitätsmodul von 200.000 N/mm² [1] und Bambus hat lediglich einen E-Modul von 20.000 N/mm² [5]. Der Elastizitätsmodul ist ein Materialwert, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung bei der mechanischen Beanspruchung eines festen Körpers beschreibt. Der Zahlenwert des E-Moduls ist umso größer je mehr Widerstand ein Material seiner Verformung entgegen setzen kann. Ein Material mit einem hohen E-Modul ist demnach steifer als ein Material mit einem niedrigen E-Modul. Meine erste Herausforderung für das Gelingen meiner Arbeit besteht nun darin, die Steifigkeit der Bambusstäbe zu verbessern. Nach vielen Stunden des Tüftelns und einigen misslungenen Versuchen mit verschiedenen Beschichtungen habe ich mich für eine einfache Umwicklung der Bambusstäbe mit Glasfasergewebeband (Abb. 14) entschlossen. Nachdem die Stäbe zunächst mit einer Suspension aus Epoxidharz, Zement und Quarzsand vor Wasseraufnahme geschützt wurden, habe ich in einem weiteren Arbeitsschritt die Bambusstäbe mit einer Schicht Glasfasergewebeband eng in Verbindung mit der Epoxid/Zement/Quarzsand-Suspension umwickelt. Bei weiteren Versuchsreihen wurde der letzte Vorgang ein bis dreimal wiederholt. Von jeder Versuchsreihe habe ich jeweils sechs Versuchsstäbe hergestellt. Zunächst bestand ein Problem darin, die richtige Mixtur von Epoxidharz, Zement und Quarzsand zu ermitteln. Bei den ersten Versuchen mit einem Gewichtsverhältnis Zement zu Epoxidharz von 1 : 3 ließ sich diese Suspension nur sehr schlecht verarbeiten, da sie zu zähflüssig war. Der Zementanteil wurde schrittweise verringert bis zu einem Gewichtsverhältnis von 1 : 5. Dabei wurden die Gewichtsanteile mit einer Kern Präzisionswaage ermittelt. Um die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchungen zu erhöhen, wurde die auf dem Bambusstab aufgebrachte Suspension noch mit einem Gemisch aus Zement und getrocknetem Quarzsand abgestreut. Hierfür stellte sich nach mehrmaligen Versuchen ein Volumenverhältnis Zement zu Quarzsand von 1 : 3 als praktikabel heraus.

Nun musste ich noch eine Lösung finden, um die Verbundwirkung zwischen Beton und Bambusstab noch weiter zu verbessern. Dazu habe ich mir nochmal die Ergebnisse zu den Bruchlasten der Betonbalken aus dem Vorjahr angesehen. Bei der Analyse der Versuchsergebnisse der Betonbalken fällt auf, dass der Verbund zwischen Bambus und Beton auf jeden Fall noch verbessert werden kann. Beim Aufschneiden der Probekörper an der Bruchkante mit einem Einhand-Winkelschleifer konnte man deutliche Unterschiede im Hinblick auf die Verbundtragfähigkeit bei Bambusbeton (Abbildung 1und 2) und Stahlbeton (Abbildung 3 und 4) erkennen.

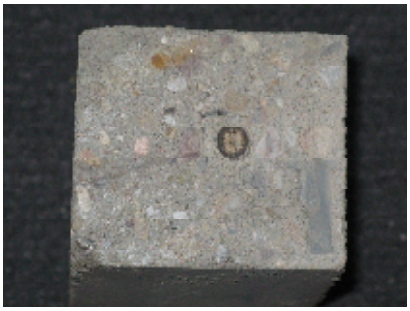


Abb. 1: Schnitt an Bruchfläche Bambusbeton (Quelle: eigenes Foto)

Abb. 2: Schnitt hinter Bruchfläche Bambusbeton (Quelle: eigenes Foto)

Bei den Bambusbetonbalken gab es bis zur Bruchlast nur einen einzigen erkennbaren Riss senkrecht zur Bambusstabachse. Der Bruch erfolgte kurz nach der ersten Rissbildung im Beton. Dieses Bruchverhalten steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit dem unzureichenden Verbund von Bambus und Beton und mit dem geringeren Elastizitätsmodul von Bambus zu Betonstahl. Bei einem der Bambusprüfkörper konnte ich nach dem Belastungsversuch den Bambusstab im Beton bewegen (Abbildung 5 und 6). Dies ist sicherlich ein weiterer Hinweis für eine fehlende bzw. nur geringe Verbundtragfähigkeit.

Abb. 3: Schnitt an Bruchfläche Stahlbeton (Quelle: eigenes Foto)

Abb. 4: Schnitt hinter Bruchfläche Stahlbeton (Quelle: eigenes Foto)

Abb. 5: Aus der Betonmatrix gelöster Bambusstab, Position 1 (Quelle: eigenes Foto)

Abb. 6: Aus der Betonmatrix gelöster Bambusstab, Position 2 (Quelle: eigenes Foto)

Ich versuchte nun zunächst einmal die Theorie der Verbundwirkung von Stahlbeton zu verstehen, um diese dann vielleicht auf den Verbundwerkstoff Bambusbeton anzuwenden.

Die Verbundfestigkeit von geripptem Betonstahl beruht auf drei Verbundarten:

- **Haftverbund**
  Der Haftverbund beruht auf einer Klebewirkung und wird auf Adhäsions- und Kapillarkräfte bei der Erhärtung des Zementleims zurückgeführt. Der Haftverbund wird bereits bei geringen Relativverschiebungen zerstört. Wirksam ist er nur bei Dehnungsgleichheit zwischen Stahl und Beton. Daher ist der Haftverbund allein für den Betonbau unzureichend.

- **Scher- oder Formverbund**
  Nach Zerstörung des Haftverbunds ist die mechanische Verkeilung der Stahlrippen mit den dazwischenliegenden Betonkonsolen für die Kraftübertragung verantwortlich. Der Formverbund wird durch eine ausgeprägte Profilierung der Staboberfläche wirksam.
  Der Scherverbund ist der wirksamste Verbundmechanismus.

- **Reibungsverbund**
  Nach dem kompletten Abscheren der Betonkonsolen ist Verbund nur noch infolge Reibung in der Grenzschicht zwischen Betonstahl und Beton möglich. Der Grad der Kraftübertragung wird durch die Beschaffenheit der Stahloberfläche und die Höhe des anliegenden Querdrucks beeinflusst.

Bei Bambusstäben mit einer Glasfaserprofilierung wird sich allerdings sehr wahrscheinlich nach Überschreiten des Haftverbundes wegen der im Vergleich zu Betonstahl wesentlich weicheren Oberflächenprofilierung ein abweichendes Verbundverhalten ergeben.

Der Betonstahl ist mit Beton umgeben und liegt mit diesem im Verbund. Nur deshalb ist es möglich, dass entlang der Stabrichtung Spannungen bzw. Kräfte zwischen Betonstahl und Beton übertragen werden. Im Wesentlichen werden die Spannungen durch Formschluss über die Rippen übertragen. Die Anhaftungsspannungen bzw. Adhäsionsspannungen des Betons am Betonstahl sind dem gegenüber sehr klein und können vernachlässigt werde.

Damit die Zugkraft im Ring nicht zu groß wird, müssen Form und Größe der Rippen optimiert und über die bezogene Rippenfläche definiert werden.

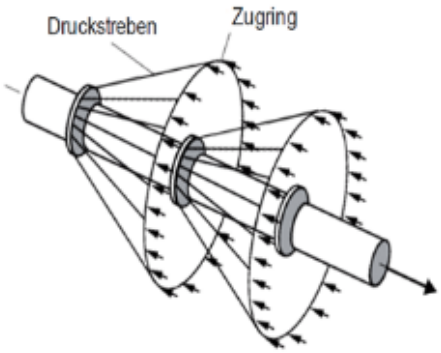
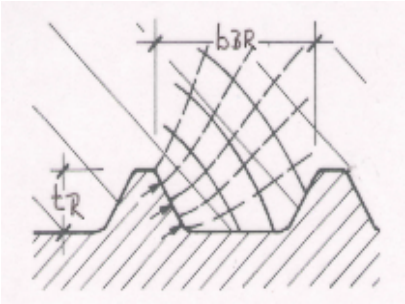


Abbildung 7: Räumlicher Spannungszustand mit lokaler Kraftübertragung vom Beton auf die Stahlrippen (Quelle: K. Zilch und G. Zehetmaier)

Die Rippen des Betonstahls übertragen schräge, kegelförmig ausstrahlende Druckspannungskomponenten auf den umgebenden Beton.
Über Zugringe wird die hierbei senkrecht zur Stabachse auftretende Spannungskomponente kurzgeschlossen. Für die Ausbildung der Zugringe ist eine ausreichend große Betondeckung erforderlich (Abbildung 7).

Dies soll an den beiden nachfolgenden Abbildungen 8 und 9 erläutert werden:

- Die Druckkräfte aus der Verbundwirkung treffen senkrecht auf die Rippen.
- Aufteilung der Druckkräfte auf die Stabrippen in einen vertikalen und horizontalen Anteil.
- Die Horizontalkomponente der Verbunddruckkraft wird in halber Rippenhöhe angesetzt.
- Das daraus entstehende Versatzmoment muss aus Gleichgewichtsgründen über ein Kräftepaar aus einer Zug- und Druckkomponente aufgenommen werden.
- Der innere Hebelarm z ist von der Stabrippenbreite b_{SR} abhängig.
- Bei einer breiten Stabrippe tritt dieser Zustand eher am Anfang der Stabrippe auf.



———— Zugtrajektorien
— — — — Drucktrajektorien

Abb. 8: Trajektorienverläufe bei kleinem Rippenabstand (Quelle: F. Leonhardt und E. Mönnig)

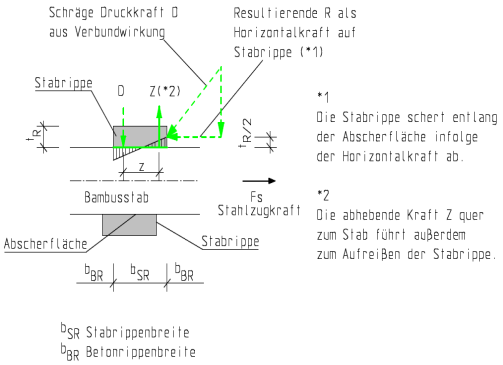


Abb. 9: Kräftemodell an Stabrippe (Quelle: eigene Skizze)

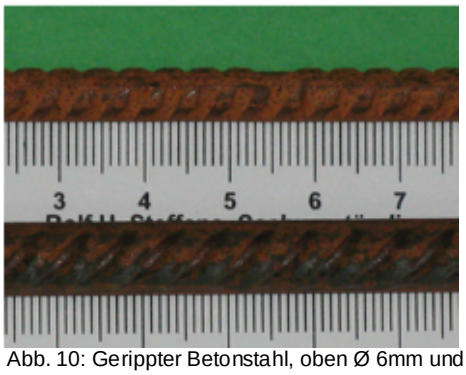


Abb. 10: Gerippter Betonstahl, oben Ø 6mm und unten Ø 8mm (Quelle: eigenes Foto)

Abb. 11: Behandelter Bambusstab mit Rippung (Quelle: eigenes Foto)

Zusammenfassend und auf eine Bewehrung aus Bambusstäben bezogen ist folgendes wichtig:

- Für die Tragfähigkeit ist der Verbund zwischen Beton und Bewehrung eine notwendige Voraussetzung.
- Die Verbundwirkung wird wesentlich durch die Profilierung der Betonstähle (Abb. 10) und Bambusstäbe (Abb. 11) erreicht.

- Der Verbund bildet die Voraussetzung für ein Zusammenwirken beider Werkstoffe und bestimmt maßgeblich die Rissbreiten und Rissabstände (Abb. 12).
- Bei fehlendem oder unzureichendem Verbund versagt der Querschnitt schon bei Auftreten des ersten Risses, da die im Beton nicht mehr aufnehmbaren Zugspannungen nicht umgelagert werden können (Abb. 13).

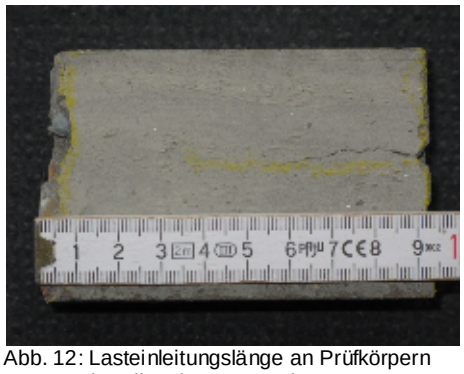


Abb. 12: Lasteinleitungslänge an Prüfkörpern (Quelle: eigenes Foto)

Abb. 13: Betonbalken versagt bei Auftreten des ersten Risses (Quelle: eigenes Foto)

Die Lasteinleitungslänge l_{es} für Stahlbeton kann vereinfacht nach G. König wie folgt berechnet werden:

les = (ds x Ac)/(4 x 1,8 x As) = (0,6 cm x 6 cm x 5 cm)/(4 x 1,8 x 0,28 cm²) = 8,9 cm

Um die Verbundwirkung zwischen Bambusstab und Beton zu verbessern, wurde die Rippung nun mit einem AR-Glasfaser-Roving hergestellt. Als Roving wird ein Bündel, Strang oder Multifilamentgarn aus parallel angeordneten Endlosfasern (Filamenten) bezeichnet [15]. Der Querschnitt eines Rovings ist meist elliptisch oder rechteckig (Abb. 15). Vor dem Aufbringen des Rovings auf den Bambusstäben habe ich ihn zunächst mit einer langsam laufenden Bohrmaschine zu einem runden Querschnitt mit einem Durchmesser von ca. 1,35 Millimeter gedreht und zur besseren Weiterverarbeitung auf einer Rolle aufgespult (Abb. 15).

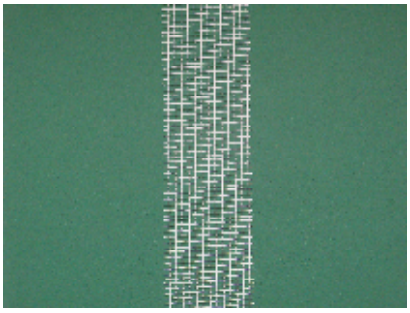


Abbildung 14: Glasfasergewebeband (Quelle: eigenes Foto)

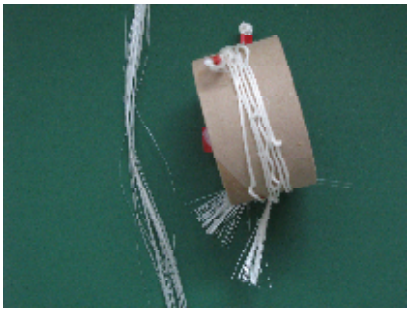


Abbildung 15: Roving links im Lieferzustand Roving rechts gedreht und aufgespult (Quelle: eigenes Foto)

Die benötigten Bambusstangen habe ich in einem örtlichen Baumarkt gekauft. Folgende Bambusstangen waren dort z. B. erhältlich (Tabelle 2):
Es sind aber durchaus auch Bambusstangen zwischen 3 m und 6 m im Handel zu bekommen.
Das Epoxidharz, Zement und Quarzsand habe ich bei einem Baustoffhändler gekauft. Das AR-Glasfaser-Roving sowie die AR-Glasfasern für den Beton konnte ich bei einem Großhändler erwerben.

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 2: Beispiele Bambusdurchmesser

Nachdem die unterschiedlichen Beschichtungen der Bambusstäbe einschließlich der Herstellung einer Rippung mit einem AR-Glasfaser-Roving fertig gestellt waren, konnte ich mit der Ermittlung von E-Modul und Biegesteifigkeit beginnen. Dabei wurden Versuche mit Betonstahlstäben, Glasfaserstäben und Bambusstäben durchgeführt. Nachdem diese Versuche abgeschlossen waren, mussten wieder Betonbalken mit verschiedenen Bewehrungsstäben betoniert werden.

Nun musste ich mir überlegen, wie ich die Tragfähigkeit meines Bambusbetons annähernd ermitteln und mit dem üblichen Stahlbeton vergleichen kann. Da die Probekörper wegen des Transports nicht zu groß und auch nicht zu schwer werden durften, entschied ich mich diesmal für Beton-balken mit den Abmessungen Länge x Breite x Höhe = 68 x 12 x 7 cm. Dazu baute ich Holzschalungen mit den entsprechenden lichten Abmessungen. Jeweils an den Kopfenden bohrte ich jeweils zwei ca. 20 mm starke Löcher, durch die ich die Bewehrungsstäbe durchschieben konnte (Abb. 16).

Den notwendigen Betonstahl, Glasfaserstäbe und Beton kaufte ich bei einem Baustoffhändler. Die 6 und 8mm starken Betonstähle sowie die Glasfaserstäbe wurden jeweils auf eine Länge von ca. 1,10-1,20m geschnitten. Als Beton verwendete ich von der Firma Sakret den Beton-Estrich zur Verwendung als Beton C25/30 mit einer Korngröße von 0 – 8 mm.

Um die Rissbildung von Beton positiv zu beeinflussen entschied ich mich für die Zugabe von Glasfasern. Glasfasern benötigen keine Betonüberdeckung als Korrosionsschutz. Durch den geringen Materialverbrauch und der mineralischen Zusammensetzung sind Glasfasern ein ökologischer Baustoff. Glasfasern besitzen einen E-Modul von ca. 7.500 kN/cm² und haben damit einen größeren E-Modul als Beton. Da Glas mit den Alkalien des Betons reagiert, musste ich alkalibeständige Glasfasern verwenden. Daher besorgte ich mir alkaliresistente Glasfasern (AR-Glasfasern). Diese Glasfasern haben einen Zirkonoxidanteil von ca. 17%. Die 6 und 12 mm langen Kurzfasern gab ich am Ende des Mischvorgangs in jeweils einer Dosierung von 0,8 Vol.-% dem Frischbeton bei.

Abbildung 16: Zusammenbau der Schalung
(Quelle: eigenes Foto)

Abbildung 17: Betonieren der 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 der geplanten Höhe verbleiben. Zuletzt wässerte ich noch die Holzschalungen, damit das Holz nicht dem Beton das Anmachwasser entzieht. Jetzt konnte ich die Probekörper betonieren (Abb. 17).

Nach dem Einfüllen des Betons in die Schalungen wurden die Prüfkörper mit PE-Folie abgedeckt und bei normalem Raumklima (ca. 16°C und 50 % Luftfeuchtigkeit) gelagert. Die Lagerbedingungen aller hergestellten Probekörper bis zu ihrer Prüfung waren absolut gleich. Nach ca. jeweils einer Woche wurden die Körper ausgeschalt und lagerten bis zur Prüfung unter oben beschriebenen Bedingungen.

Beton-balken	Abmessungen [cm]	Bewehrung
1	68 x 12 x 7	2 Betonstahlstäbe BSt IV Ø 6mm gerippt
2	68 x 12 x 7	2 Betonstahlstäbe BSt IV Ø 8mm gerippt
3	68 x 12 x 7	2 Glasfaserstäbe ComBAR Ø 8mm
4	68 x 12 x 7	2 Bambusstäbe mit Epoxidharz/Zement und Quarzsand vorbehandelt, mit 0,8 Vol.-% Glasfasern im Beton
5	68 x 12 x 7	2 Bambusstäbe mit Epoxidharz/Zement und Quarzsand vorbehandelt, mit einer Lage Glasfasergewebe, mit 0,8 Vol.-% Glasfasern im Beton
6	68 x 12 x 7	2 Bambusstäbe mit Epoxidharz/Zement und Quarzsand vorbehandelt, mit zwei Lagen Glasfasergewebe, mit 0,8 Vol.-% Glasfasern im Beton
7	68 x 12 x 7	2 Bambusstäbe mit Epoxidharz/Zement und Quarzsand vorbehandelt, mit drei Lagen Glasfasergewebe, mit 0,8 Vol.-% Glasfasern im Beton

Tabelle 3: Aufstellung der betonierten Prüfkörper

2.3 Versuche und Auswertung

Da ich den Zeit- und Materialaufwand minimieren wollte, habe ich nach einer entsprechenden Lösung gesucht, um nicht von allen Versuchsreihen Betonbalken anfertigen zu müssen. Die Lösung war das Hooke´sche Gesetz (benannt nach Robert Hooke 1635-1703).

Das Hooke´sche Gesetz beschreibt die elastische Verformung von Festkörpern, wenn deren Verformung proportional zur einwirkenden Kraft ist. Man spricht dann auch von einem linear-elastischen Verhalten eines Werkstoffes. Es kann demnach dort angewendet werden, wo die einwirkende Kraft nahezu linear von der Auslenkung oder Ausdehnung des Festkörpers abhängt. Ein Festkörper verformt sich, wenn er durch eine äußere Kraft belastet wird. Von der Elastizität eines Körpers spricht man, wenn nach einer durch eine äußere Kraft verursachte Verformung der Körper in seinen ursprünglichen Zustand zurückkehrt. Daher nennt man diese Verformung eine elastische Verformung. Von einer plastischen Verformung spricht man, wenn die durch eine Belastung verursachte Verformung nach der Entlastung zum Teil oder im ganzen dauerhaft zurück bleibt. Für die Definition des Elastizitätsmoduls spielt die mechanische Spannung und das Spannungs-Dehnungs-Diagramm noch eine wichtige Rolle. Die Spannung σ wird definiert als das Verhältnis der wirkenden Kraft F und der Fläche A, an der die Kraft senkrecht angreift.

$$\sigma = F/A \quad [N/mm^2] \text{ oder } [MPa] \qquad (1)$$

Durch die an einen Körper mit der Länge L angelegte Spannung erfährt der Körper eine Längenänderung ΔL. Das Verhältnis aus ΔL zu L wird als relative Dehnung bezeichnet.

$$\varepsilon = \Delta L/L \qquad (2)$$

Trägt man die Spannung und die Dehnung in ein Diagramm ein, so erhält man ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Man erkennt im elastischen Bereich einen proportionalen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Die Dehnung tritt nur auf, solange eine Spannung wirkt. Die Steigung der Geraden ist für jeden Werkstoff spezifisch. Die Dehnung des Körpers hängt dabei von der einwirkenden Kraft bzw. der Spannung im Körper ab. Die Proportionalitätskonstante E steht für den Elastizitätsmodul des Materials, aus dem der Körper besteht.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [N/mm^2] \text{ oder } [MPa] \qquad (3)$$

Dieser Zusammenhang wird im Hooke´schen Gesetz dargestellt.

$$F/A = \sigma = E \cdot \varepsilon \quad [N/mm^2] \text{ oder } [MPa] \qquad (4)$$

Der Proportionalitätsfaktor E lässt sich somit wie folgt darstellen:

$$E = \sigma/\varepsilon \text{ und } E = \tan \beta \qquad (5) \text{ und } (6)$$

Die Messung des Elastizitätsmoduls kann mit verschiedenen Methoden wie z. B. mit dem Kundt´schen Rohr, einem Piezokristall oder einer Blattfederschwingung erfolgen. Für meine Versuche habe ich die sogenannte Balkenmethode gewählt, da der messtechnische Aufwand für mich am sinnvollsten erschien.

Für den bei der Prüfeinrichtung vorliegenden Träger auf zwei Stützen mit einer mittigen Einzellast folgt für die Durchbiegung nach [3]:

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} = \frac{m \cdot g \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad [mm] \qquad (7)$$

$$E = \frac{1}{48} \cdot \frac{F \cdot L^3}{f \cdot I} = \frac{m \cdot g \cdot L^3}{48 \cdot f \cdot I} \quad [N/mm^2] \qquad (8)$$

Das für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls notwendige Flächenträgheitsmoment I kann ebenfalls in [3] nachgeschlagen werden. Für einen Stab mit dem Durchmesser d ergibt sich:

$$I = \frac{\pi \cdot r^4}{4} = \frac{\pi \cdot (d/2)^4}{4} = \frac{\pi \cdot d^4/16}{4} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad [mm^4] \qquad (9)$$

Da bei den Bambusstäben von Natur aus Querschnittsänderungen im Verlauf der Stabachse vorhanden sind, ist eine Berechnung des Flächenträgheitsmomentes mit den mir zur Verfügung stehenden Möglichkeiten für diese Stäbe schwierig bis ausgeschlossen. Daher habe ich nach einer Alternative ohne Flächenträgheitsmoment gesucht, um die Tragfähigkeit der Bambusstäbe mit den herkömmlichen Bewehrungsstäben vergleichen zu können. Aus der Formel (7) müsste das Produkt $E \cdot I$ entfallen. Das Produkt aus $E \cdot I$ wird in der Festigkeitslehre als Steifigkeit bezeichnet. Die Steifigkeit ist eine Kenngröße um das Verformungsverhalten eines Werkstoffs zu beschreiben. Eine hohe Steifigkeit bedeutet auch hier eine geringe Verformung bei einwirkender Kraft. Folgender Zusammenhang besteht zwischen der Biegesteifigkeit B, dem E-Modul sowie dem Flächenträgheitsmoment I:

$$B = E \cdot I \text{ und } E = B/I \qquad (10) \text{ und } (11)$$

Durch Gleichsetzen von Gleichung (8) und (11) erhält man:

$$\frac{B}{I} = \frac{m \cdot g \cdot L^3}{48 \cdot f \cdot I} \qquad (12)$$

$$B = \frac{m \cdot g \cdot L^3}{48 \cdot f} \quad [Nmm^2] \qquad (13)$$

Somit können die einzelnen Bewehrungsstäbe hinsichtlich ihrer Biegesteifigkeit relativ einfach verglichen werden.

2.3.1 Elastizitätsmodul und Biegesteifigkeit

Um den Elastizitätsmodul bzw. die Biegesteifigkeit von Bewehrungsstäben zu ermitteln, baute ich mir eine einfache Prüfeinrichtung (Abb. 18 und 19). Als Grundplatte der Prüfeinrichtung besorgte ich mir in einem Baumarkt eine 24mm starke Multiplex-Platte mit den Abmessungen 1300mm x 323mm. Für die Auflager-konstruktion sägte ich aus einem Reststück einer 24mm starken Multiplexplatte zwei Holzplatten mit den Anmessungen 197,5mm x 323mm heraus. An diesen Grundplatten befestigte ich mit Stockschrauben M8 jeweils ein Holzstück mit den Abmessungen 60mm x 60mm x 300mm. Um die Auflagefläche für die Stäbe möglichst gering zu halten und eine genaue Messung der Spannweite zu gewährleisten, verwendete ich ein 3mm starkes und 60mm x 80mm großes Aluminiumblech, das ich mit jeweils zwei Schrauben M6 an den Hölzern befestigte. Die Fixierung der Auflagerkonstruktion auf der Grundplatte erfolgte mit jeweils zwei M8 Schraubhülsen und den entsprechenden Maschinenschrauben. Um Stäbe mit verschiedenen Längen messen zu können, wurden noch weitere Schraubhülsen in der Grundplatte der Prüfeinrichtung eingelassen. So können Stäbe mit einer Spannweite von 1000 Millimeter bis ca. 400 Millimeter untersucht werden. Bei einer noch kleineren Spannweite der Stäbe werden die Ergebnisse zu ungenau, da die zu messenden Verformungen zu klein werden. Bei den ersten Versuchen mit den Stäben stellte sich heraus, dass einige Stäbe von dem Auflager weg rollten. Daher wurden die Aluminiumbleche an der Oberseite leicht konkav hergestellt.
Die Verformung der zu prüfenden Stäbe wird mit einer Messuhr der Firma Hommel Hercules Werkzeughandel (Abbildung 20) gemessen. Die Messuhr misst mit einer Genauigkeit von 1/100 Millimeter. Von dieser feinen Messgenauigkeit erhoffe ich mir aussagekräftige Messergebnisse. Da die Durchbiegungen bei den zuletzt getesteten Betonbalken zwischen ca. 20 und 50 Millimetern betrug, habe ich eine Messuhr mit einem Messbereich von 50 Millimetern mit einem entsprechenden Haltesystem verwendet. Die Position der Messuhr kann damit durch einfaches Justieren genau an den zu prüfenden Stab angepasst werden. Der Magnetmessständer Abbildung 21) kann auf dem auf der Grundplatte mit vier Schrauben M3 angebrachten 1,5 mm starkem Stahlblech einfach durch Magnetkraft fixiert werden.

Abb. 18: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Elastizitäts-moduls bzw. der Biegesteifigkeit (Quelle: eigenes Foto)

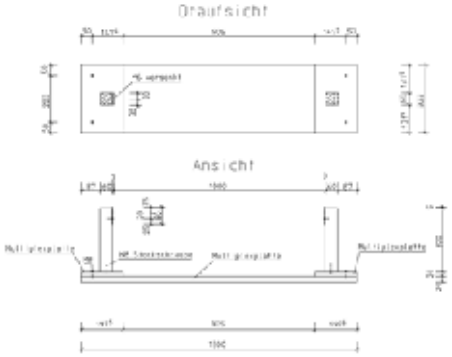


Abbildung 19: Skizze zum nebenstehenden Versuchsaufbau

Abbildung 20: Messuhr (Quelle: eigenes Foto)

Abbildung 21: Magnetmessständer (Quelle: eigenes Foto)

Abbildung 22: Adapter für Messkopf (Quelle: eigenes Foto)

Folgende Gewichte (Abbildung 23) wurden bei den Messungen verwendet:

➢ Teller für Schlitzgewichte	50g
➢ Schlitzgewicht	50g
➢ Schlitzgewicht	200g
➢ Schlitzgewicht	200g
➢ Schlitzgewicht	500g
	1000g

Abb. 23: Teller u. Gewichte und Metallring (Quelle: eigenes Foto)

Die Gewichte bestehen aus Messing mit einer je nach Gewicht unterschiedlichen Dicke und einem Durchmesser von 65 Millimeter. An einer Stelle sind die Gewichte geschlitzt, so dass sie auf den Teller aufgeschoben werden können. So kann die Belastung relativ schnell und ohne größere Probleme verändert werden. Der Teller selbst zur Aufnahme der Gewichte, einschließlich des Messingstabs und des Hakens, hat ein Gewicht von 50g. Da der Haken nicht um die zu prüfenden Stäbe passt und somit keine genaue Messung möglich ist, lege ich bei jeder Messung einen Metallring über den Stab. An diesem Ring kann der Teller dann angehangen werden. Das Eigengewicht des Rings wird bei den Messungen wegen Geringfügigkeit vernachlässigt, da er nur 1,75 Gramm wiegt.

Bei den ersten Messungen zeigte sich jedoch, dass der Messkopf der Messuhr nicht ausreichend auf dem Stab fixiert werden konnte. Es kam zu seitlichen Verschiebungen des Messkopfs, so dass Messfehler entstanden. Um diese Messfehler zu minimieren bzw. auszuschließen, habe ich einen Adapter aus einer Kunststoffrosette gebastelt (Abbildung 22). Der Adapter ist fest mit dem Messkopf verbunden und sitzt wie ein Sattel auf den zu prüfenden Stäben auf.

Bei dem Versuch werden die verschiedenen Prüfstäbe auf zwei Seiten frei auf einem 3mm starken Aluminiumblech aufgelagert und in der Mitte der Auflagerpunkte belastet. Mit einer Messuhr wird an

der Belastungsstelle die Durchbiegung gemessen. Die Messuhr Die Belastung der Prüfstäbe wird durch allmähliches Hinzulegen von Gewichtsscheiben langsam erhöht. Die Messuhr wird bei Versuchsbeginn mit einem bestimmten Ausschlag eingestellt. Der Ausschlag wird dann durch die Belastung verringert, da die Messuhr von oben die Verformung nach unten misst. Der Anfangswert auf der Messuhr ohne jegliche Belastung wird notiert. Bei der anschließenden Messung werden dann die entsprechenden Messwerte vom Anfangswert subtrahiert und man erhält die jeweilige Durchbiegung des Prüfstabs in Millimetern. Danach werden die Gewichte vorsichtig entfernt und die Durchbiegung mit der entsprechenden Belastung notiert. So erhält man Be- und Entlastungswerte zu jedem einzelnen Stab. Mithilfe der Auflagerspannweite und der Abmessungen des Prüfstabs, der Durchbiegung sowie der entsprechenden Belastung kann ich den Elastizitätsmodul bzw. die Biegesteifigkeit der verwendeten Stäbe berechnen.
Alle Messungen erfolgten bei einer Raumtemperatur von 20°C und einer Luftfeuchtigkeit von ca. 50%. Die zu prüfenden Stäbe wurden vor der Messung mindestens 24 Stunden bei diesen Klimadaten gelagert.

2.3.2 Tragfähigkeit der Betonbalken

Um die Tragfähigkeit der hergestellten Betonbalken zu testen, baute ich mir bereits im letzten Jahr folgende Prüfeinrichtung, die nun wieder Verwendung findet. Dazu besorgte ich mir eine 38 mm starke Spanplatte und eine 24 mm starke Multiplex-Platte mit den Abmessungen 100 x 40 cm, die ich miteinander verschraubte. Unter die Holzplatten schraubte ich an den langen Seitenrändern jeweils ein Holz mit den Abmessungen von 53 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, möglichst genau zu bestimmen. Zwischen dem Dorn der Presse und der Radlastwaage lege ich ein 24 mm starkes Hartholzstück mit den Abmessungen 7 x 25 cm. Somit wird die Punktspannung auf der Radlastwaage nicht zu groß. 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, somit ist relativ genaue Messung gewährleistet. Die Betonbalken liegen während der Lastprüfung auf jeweils einem Holzbalken mit den Abmessungen von 74 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.

Abbildung 24: Versuchsaufbau Traglastprüfung Betonbalken (Quelle: eigenes Foto)

Abb. 25: Radlastwaage u. Drehdornpresse (Quelle: eigenes Foto)

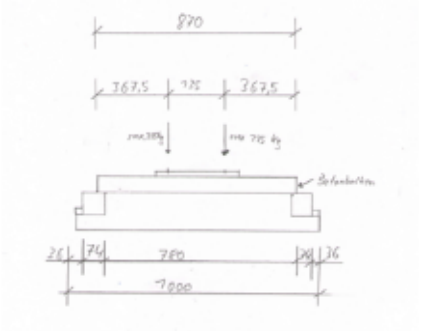


Abbildung 26: Belastungsskizze Betonbalken

Bei 225 kg Auflagerlast bekomme ich einen Auflagerdruck von 225 kg/(7,4 x 4,5 cm) = 6,76 kg/cm². Das ist 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 (Abb. 24). Bei den ersten Vorversuchen bewegten sich die nicht fixierten 74 x 74 mm Auflager-hölzer schon bei einer geringen Belastung horizontal nach außen. Deshalb schraubte ich am Rand der Grundplatte jeweils noch eine Latte mit den Abmessungen 400 x 36 x 17 mm auf. Da ich neben der Ermittlung der jeweiligen Bruchlast auch die entsprechende Verformung feststellen möchte, hatte ich zunächst eine Halterung zur Aufnahme einer Risskarte bzw. eines Tiefenmessers gebastelt. Die Messung mit der Risskarte erwies sich jedoch als zu ungenau. Da mir nun eine

Messuhr zur Verfügung steht, werde ich die Messung der jeweiligen Verformung mit der Messuhr vornehmen.

2.3.1 Versuche mit den Bewehrungsstäben

Um meine Prüfeinrichtung zu testen, ermittelte ich zunächst die Verformungen von den Betonstählen und Glasfaserstäben. Die Messergebnisse können beim Regionalwettbewerb eingesehen werden. Danach errechnete ich mit der Formel (8) den Elastizitätsmodul der Stäbe und konnte eine annähernde Übereinstimmung mit den Literaturwerten feststellen.

Elastizitätsmodul E				
Material		Gemittelte Messwerte [N/mm²]	Standardabweichung des Mittelwerts [N/mm²]	Literaturwert [N/mm²]
1	Betonstahl Ø 6mm	208.545	1.476	200.000
2	Betonstahl Ø 8mm	190.398	2.540	200.000
3	Glasfaserstab Ø 8mm	84.270	285	≥60.000

Tabelle 4: Messwerte E-Modul

Nun konnte ich alle weiteren Messungen und Berechnungen zur Biegesteifigkeit vornehmen, die in der folgenden Tabelle aus Platzgründen zusammengefasst werden. Alle Einzel- und Messergebnisse können, wie schon oben beschrieben, beim Regionalwettbewerb der Jury zur Verfügung gestellt werden.

Biegesteifigkeit B					
Material		Gemittelte Messwerte [Nmm²]	Standardabweichung des Mittelwerts [Nmm²]	Messwerte max [Nmm²]	Messwerte min [Nmm²]
1	Betonstahl Ø 6mm	$13{,}300 \cdot 10^6$	$0{,}108 \cdot 10^6$	$13{,}408 \cdot 10^6$	$13{,}192 \cdot 10^6$
2	Betonstahl Ø 8mm	$38{,}306 \cdot 10^6$	$0{,}520 \cdot 10^6$	$38{,}826 \cdot 10^6$	$37{,}786 \cdot 10^6$
3	Glasfaserstab Ø 8mm	$16{,}944 \cdot 10^6$	$57{,}223 \cdot 10^3$	$17{,}001 \cdot 10^6$	$16{,}887 \cdot 10^6$
4	Bambusstab unbehandelt	$10{,}681 \cdot 10^6$	$0{,}157 \cdot 10^6$	$10{,}838 \cdot 10^6$	$10{,}524 \cdot 10^6$
6	Gerippter Bambusstab mit zweifacher Umwicklung	$14{,}370 \cdot 10^6$	$0{,}475 \cdot 10^6$	$14{,}845 \cdot 10^6$	$13{,}895 \cdot 10^6$
9	Gerippter Bambusstab mit dreifacher Umwicklung	$15{,}739 \cdot 10^6$	$0{,}493 \cdot 10^6$	$16{,}232 \cdot 10^6$	$15{,}246 \cdot 10^6$
12	Gerippter Bambusstab mit einfacher Umwicklung	$12{,}843 \cdot 10^6$	$0{,}328 \cdot 10^6$	$13{,}171 \cdot 10^6$	$12{,}515 \cdot 10^6$

Tabelle 5: Messwerte Biegesteifigkeit

In Tabelle 5 erkennt man sehr gut, dass durch die Bearbeitung der Bambusstäbe die Biegesteifigkeit auf der sicheren Seite liegend von ca. 15% bei der einfachen Umwicklung bis ca. 41% bei der dreifachen Umwicklung gesteigert werden kann. Natürlich nimmt mit der speziellen Behandlung der Bambusstäbe auch der Durchmesser der Stäbe zu. Bei den untersuchten Stäben um durchschnittlich 2 bis 3,5 mm. Bei dickeren Bambusstäben relativiert sich diese Zunahme des Durchmessers. Schon bei einer zweifachen Umwicklung der Bambusstäbe kann die Biegesteifigkeit eines herkömmlichen Betonstahls mit dem Durchmesser 6mm erreicht werden.

2.3.2 Versuche mit den Betonbalken

Die Traglastversuche an den betonierten Betonbalken werde ich bis zum Regionalwettbewerb noch mit meiner selbstgebauten Prüfeinrichtung durchführen und die Ergebnisse dort präsentieren.

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

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.

Vorteile:

- Bambus ist in vielen Entwicklungsländern einfach zugänglich.
- Er nimmt große Mengen CO_2 aus der Atmosphäre auf.
- Er hat geringe Produktions- und Transportkosten.
- Bambus bzw. Bambusbeton ist korrosionsbeständig.
- Er hat eine geringe Umweltbelastung
- Bambus hat eine hohe Zugfestigkeit.
- Er ist ein nachwachsender Baustoff.
- Er ist leichter als Betonstahl.
- Er ist elektrisch und thermisch nicht leitend.
- Er ist nicht magnetisch oder magnetisierbar.

Nachteile:

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

3 Schluss

3.1 Fazit

1. Die Ergebnisse der bisherigen Versuche zur Biegesteifigkeit und Tragfähigkeit von Bambusbeton geben mir Mut, weitere Experimente mit diesem Baustoff durchzuführen. Die ermittelten Werte zeigen, dass man tragende Bauteile mit Bambusbeton herstellen kann. Eine Erhöhung der Bruchlast mit einer Verbesserung der Verbundtragfähigkeit und einer zusätzlichen Glasfaserbewehrung im Beton ist sicherlich möglich. Weitere Verbesserungen bzw. Varianten werde ich bis zum Regionalwettbewerb in Düsseldorf noch erarbeiten.

2. 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 Anwendung finden kann, um auch in der Praxis als umweltfreundliche und wirtschaftliche Alternative zu den herkömmlichen Materialien eingesetzt werden zu können. Anlässlich des Landeswettbewerbs in Leverkusen vom 19.03.2018 bis 21.03.2018 werde ich weitere Versuche mit Bambusstäben für eine praktische Anwendung vorstellen. Bis dahin versuche ich die Bauweise Bambusbeton für die Praxis zu optimieren. Weiterhin werde ich versuchen, einen Ansatz für eine Bemessungsregel zu erstellen.

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 : Schnitt an Bruchfläche Bambusbeton..... 8
Abbildung 2 : Schnitt hinter Bruchfläche Bambusbeton..... 8
Abbildung 3 : Schnitt an Bruchfläche Stahlbeton..... 9
Abbildung 4 : Schnitt hinter Bruchfläche Stahlbeton..... 9
Abbildung 5 : Aus der Betonmatrix gelöster Bambusstab, Position 1..... 9
Abbildung 6 : Aus der Betonmatrix gelöster Bambusstab, Position 2..... 9
Abbildung 7 : Räumlicher Spannungszustand mit lokaler Kraftübertragung 10
Abbildung 8 : Trajektorienverläufe bei kleinem Rippenabstand..... 10
Abbildung 9 : Kräftemodell an Stabrippe..... 10
Abbildung 10 : Gerippter Betonstahl..... 10
Abbildung 11 : Behandelter Bambusstab mit Rippung..... 10
Abbildung 12 : Lasteinleitungslänge an Prüfkörpern..... 11
Abbildung 13 : Betonbalken versagt bei Auftreten des ersten Risses..... 11
Abbildung 14 : Glasfasergewebeband..... 11
Abbildung 15 : Glasfaser-Rovings..... 11
Abbildung 16 : Zusammenbau der Schalung..... 12
Abbildung 17 : Betonieren der Betonbalken..... 12
Abbildung 18 : Versuchsaufbau Elastizitätsmodul bzw. Biegesteifigkeit..... 15
Abbildung 19 : Skizze zum Versuchsaufbau..... 15
Abbildung 20 : Messuhr..... 15
Abbildung 21 : Magnetmessständer..... 15
Abbildung 22 : Adapter für Messkopf..... 15
Abbildung 23 : Teller, Gewichte und Metallring..... 15
Abbildung 24 : Versuchsaufbau Traglastprüfung Betonbalken..... 16
Abbildung 25 : Radlastwaage und Drehdornpresse..... 16
Abbildung 26 : Belastungsskizze Betonbalken..... 16

5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Bambus..... 6
Tabelle 2: Beispiele Bambusdurchmesser..... 11
Tabelle 3: Aufstellung der betonierten Prüfkörper..... 12
Tabelle 4: Messwerte E-Modul..... 17
Tabelle 5: Messwerte Biegesteifigkeit..... 17

7 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] Grehn, Joachim und Krause, Joachim: Metzler Physik, 3. Auflage, Kiel, Neumünster im Herbst 1998

[3] Wetzell, Otto W., Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln, 30. Auflage, Münster im Sommer 2002

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

Zeitschriftenartikel und Aufsätze:

Keine

Internetseiten:

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

[6] 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

[7] 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 ?

[8] 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

[9] 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

[10] 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

[11] 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

[12] 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

[13] http://www.cms.nodal.de/sites/1009/pdf/1.pdf: 08.02.2018, FVF-Merkblatt „Glasfasermodifizierter Beton (FMB)

[14] https://de.wikipedia.org/wiki/Hookesches_Gesetz: 2. November 2018 um 15:13 Uhr

[15] https://de.wikipedia.org/wiki/Roving: 20. September um 19:49 Uhr