



Bachelor's Thesis in der Fachrichtung Baukonstruktion / Holzbau:

Materialspezifische Aspekte zum Neubau einer Brücke im ecuadorianischen Regenwald:

Teil 1: Verfügbarkeit und Eigenschaften von Bauhölzern



Lehrstuhl:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder

Betreuer:

Dipl.-Ing. Peter Mestek
Dipl.-Ing. Norman Werther

Verfasser:

Simon Vilgertshofer

eingereicht am:

2. August 2010



Kurzfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit grundlegenden Informationen zur Verfügbarkeit und den materialspezifischen Eigenschaften von Bauhölzern, die für die Realisierung einer Brückenkonstruktion in einem Indiodorf im ecuadorianischen Regenwald erforderlich sind.

Dazu wurden vor Ort Untersuchungen durchgeführt, die in dieser Arbeit beschrieben sind. Die dabei gewonnenen Ergebnisse zeigen auf, welche Hölzer generell verfügbar sind und welche entscheidenden Eigenschaften diese aufweisen.

Die Ergebnisse werden mit Kennwerten aus der Fachliteratur verglichen und anschließend so aufgelistet, dass wichtige Kennwerte, die für die Planung der Brücke erforderlich sind, weiterverwendet werden können. Es sind somit Angaben zur Verfügbarkeit, zur Dauerhaftigkeit, zur Bearbeitbarkeit und zur Festigkeit der vorhandenen Hölzer gegeben, die einen wichtigen Schritt hin zum tatsächlichen Bau der Brücke darstellen.



Abstract

This Bachelor's Thesis deals with disposability and specific properties of timbers to be used for the realization of a bridge structure in an Indian village in the Ecuadorian rainforest.

The results obtained by on site research describe the general sources of construction timber and their basic attributes. The timbers are briefly characterized to show whether and how each is suitable for the construction of the bridge. Furthermore they are classified by German standard.

To sum up, this thesis gives information on availability, durability, resistance and machining properties of the local timbers which are decisive elements in future planning and building of the bridge.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Einleitung..... | 5 |
| 2 | Grundlegendes zum tropischen Regenwald und den dort heimischen Holzarten..... | 7 |
| 2.1 | Der tropische Regenwald am Standort der Brücke | 7 |
| 2.2 | Eigenheiten tropischer Hölzer | 8 |
| 3 | Untersuchungen vor Ort..... | 12 |
| 3.1 | Verfügbare Hölzer | 12 |
| 3.2 | Festigkeit bzw. Steifigkeit | 14 |
| 3.3 | Quellen und Schwinden | 16 |
| 3.4 | Dauerhaftigkeit..... | 17 |
| 3.5 | Bearbeitbarkeit und mögliche Querschnittsgrößen | 19 |
| 4 | Detaillierte Auflistung und Vergleich der verfügbaren Hölzer..... | 21 |
| 4.1 | Auflistung und Beschreibung der Hölzer | 21 |
| 4.1.1 | Abiu | 22 |
| 4.1.2 | Balsamo | 23 |
| 4.1.3 | Bambú..... | 24 |
| 4.1.4 | Canelo..... | 25 |
| 4.1.5 | Cedro macho | 26 |
| 4.1.6 | Chonta-Palme..... | 27 |
| 4.1.7 | Guayabillo | 28 |
| 4.1.8 | Guayacan..... | 29 |
| 4.1.9 | Huambula..... | 30 |
| 4.1.10 | Laurel | 31 |
| 4.1.11 | Pechiche | 32 |



| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.12 Tucuta | 33 |
| 4.2 Allgemeiner Vergleich der Hölzer | 34 |
| 4.3 Materialvorschläge für einzelne Bauteile..... | 35 |
| 4.3.1 Bauteile mit Bodenkontakt..... | 35 |
| 4.3.2 Ständig berechnete Bauteile..... | 35 |
| 4.3.3 Überdachte Bauteile | 36 |
| 4.4 Vergleich der Holzeigenschaften mit deutschen Festigkeitsklassen | 36 |
| 5 Fazit..... | 39 |
| 6 Literaturverzeichnis | 40 |
| 7 Abbildungsverzeichnis | 42 |
| 8 Tabellenverzeichnis | 44 |
| 9 Anhang | 45 |

1 Einleitung

Der Begriff des tropischen Regenwaldes bezeichnet das Ökosystem bzw. die Form der Vegetation, die im Gebiet zwischen dem nördlichen und dem südlichen zehnten Breitengrad vorherrscht.

Diese Gebiete, die sich unter anderem durch eine überdurchschnittlich hohe Biodiversität auszeichnen, sind in den letzten Jahrzehnten um etwa die Hälfte geschrumpft. Ausschlaggebende Gründe für die Verkleinerung dieser einzigartigen Ökosysteme sind vor allem Rodungen, die der Holzgewinnung und der Schaffung von Ackerland dienen. Eine zusätzliche Bedrohung geht von der Ölindustrie aus, da unter den Wäldern bisher ungenutzte Ölvorräte lagern, die für die Industrie eine gewinnbringende Perspektive darstellen. Die Förderungsrechte wurden der Regierung schon vor Jahren abgekauft, allerdings besitzt die indigene Bevölkerung in Ecuador die obersten 30 cm des Bodens. Sie stellt dadurch eines der letzten Hindernisse für die Industrie dar, großflächig Öl zu fördern und dadurch dem sensiblen Ökosystem über lange Zeit hinweg erheblichen Schaden zuzufügen oder es unwiderruflich zu zerstören.

Weltweit sind viele Initiativen und Vereine aktiv, die der Zerstörung entgegenwirken. Unter anderem versuchen Hilfsorganisationen im Regenwald Ecuadors die indigene Bevölkerung und ihre Kultur zu unterstützen und so die Ureinwohner und den Regenwald zu schützen.

Ein vorrangiges Ziel ist es die Bildungssituation der Indios zu verbessern. Nur so können sie auf lange Sicht hin lernen ihre Rechte gegenüber den Interessen der Wirtschaft durchzusetzen und ihre Kultur bewahren. Durch den Aufbau sogenannter Urwald-Akademien und einem damit verbundenen „Wissenschaftstourismus“ soll eine nachhaltige und wirtschaftliche Grundlage für die anliegenden Indiodörfer geschaffen werden. Weiterhin kann so ein Wissensaustausch stattfinden, der den Indios einen verantwortungsvollen Umgang mit ihrem Einkommen und ihrer Umwelt ermöglicht.

Für den Aufbau einer dieser Akademien im Dorf Sharamentsa in der ecuadorianischen Provinz Pastaza ist der Bau bzw. die Planung einer Brücke notwendig. Sie soll einen ca. 25 m breiten und 8 m tiefen Graben überspannen und so das Dorf mit der etwas außerhalb liegenden Akademie verbinden. Die Brücke soll für Fußgänger und den Transport von leichten Lasten ausgelegt werden.

Die Planung und Ausführung der Brückenkonstruktion ist aufgrund der abgeschiedenen Lage, einer nicht vorhandenen Straßenanbindung, und der vergleichsweise schlechten maschinellen Ausstattung des Dorfes mit verschiedenen Problemen verbunden. So müssen zum Beispiel sämtliche nicht im Dorf vorhandene Materialien und Maschinen entweder eingeflogen oder mit dem Schiff ins Dorf transportiert werden. Das würde sowohl einen nicht zu vernachlässigenden finanziellen Aufwand, als auch eine erhöhte Umweltbelastung mit sich bringen.

Um die Kosten gering zu halten und den Bau der Brücke so umweltschonend und nachhaltig wie möglich zu gestalten, sollen die Baumaterialien möglichst vor Ort und mit geringstem maschinellen Aufwand herstellbar sein. Nur so kann der Bau der Brücke nach diesen Kriterien gewährleistet werden.



Abbildung 1: Zukünftiger Standort der Brücke

Die Wahl der Baumaterialien hängt maßgeblich von den zu erwartenden Bodenbewegungen und dem daraus resultierenden statischen System der Brücke ab. Abhängig davon soll der Einsatz des regional verfügbaren Rohstoffs Holz maximiert werden um möglichst wenige Materialien von außerhalb einsetzen zu müssen.

Um den Bau der Brücke vorzubereiten sollen sich drei Abschlussarbeiten mit einzelnen Teilgebieten der Planung befassen. Die Gesamtplanung des Bauwerks ist das Ziel einer Diplomarbeit. Eine weitere Bachelorarbeit beschäftigt sich mit den nötigen Verbindungsmitteln und Verbindungstechniken.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist eine detaillierte Untersuchung zur Verfügbarkeit und zu den Eigenschaften des regional vorhandenen Rohstoffes Holz. Hierzu sollen die im Baugebiet vorkommenden Holzarten katalogisiert und nachfolgend

hinsichtlich ihrer für den Brückenbau relevanten Eigenschaften eingestuft werden. Dabei sollen neben den grundlegenden mechanischen Materialeigenschaften weiterhin die Dauerhaftigkeit, die Bearbeitbarkeit und die sich daraus und aus der Wuchsform der Bäume ergebenden möglichen herstellbaren Querschnitte bestimmt werden.

Letztendlich sollen mit den gewonnenen Erkenntnissen aus Literaturrecherche und in situ Untersuchungen Empfehlungen für die Materialwahl einzelner Bauteile der Brücke ausgesprochen werden. Für die Holzarten, deren Kennwerte auf eine besonders gute Eignung für einzelne Bauteile der Brücke hindeuten, soll ergänzend eine Empfehlung hinsichtlich ihrer Einordnung in deutsche Festigkeitsklassen gegeben werden.



Abbildung 2: Brückenentwürfe aus der Diplomarbeit von Stefan Loebus

2 Grundlegendes zum tropischen Regenwald und den dort heimischen Holzarten

Beschäftigt man sich mit dem Thema Tropenholz ist es unumgänglich sich zuallererst mit der generellen Situation hinsichtlich verschiedener Faktoren auseinanderzusetzen, die das Wachstum, die Beschaffenheit, die Artenvielfalt und die Dauerhaftigkeit dieser Hölzer charakterisieren.

Dazu sind im Folgenden einerseits die Bedingungen, die im tropischen Regenwald vorherrschen, kurz umrissen. Andererseits werden tropische Hölzer allgemein kurz charakterisiert.

2.1 Der tropische Regenwald am Standort der Brücke

Klimatisch betrachtet ist der zukünftige Standort der Brücke in den Bereich der humiden Warmtropen einzuordnen. Der hohe Niederschlag von 2000 bis 4000 mm pro Jahr und eine Durchschnittstemperatur von über 20 °C bedingt das Vorherrschen eines tropischen Tieflandregenwaldes. Vergleichswerte in Deutschland sind weniger als halb so groß: In München beträgt der Jahresniederschlag etwa 1000 mm und die Jahresmitteltemperatur liegt bei ca. 9 C°.

Durch die äquatornahe Lage herrscht ein Tageszeitenklima – das bedeutet, dass die Temperaturschwankungen innerhalb eines Tages größer sind als die innerhalb eines Jahres. Das hierdurch bedingte Fehlen von ausgeprägten Jahreszeiten führt zu einem nahezu perfekten Nährstoffkreislauf, der sich innerhalb der lateritischen Böden nur in der oberflächennahen und relativ dünnen Humusschicht abspielt. Nährstoffe wurden den Böden fast vollkommen entzogen und in lebende Biomasse verwandelt. Diese können aufgrund des Klimas im Fall ihres Absterbens sofort wieder in den Nährstoffkreislauf zurückgeführt werden.

Durch diese Gegebenheiten ist das Vegetationsbild ein völlig anderes, als das der gemäßigten Breiten. Das ist, abgesehen von den generellen geographischen Unterschieden, auch auf die Tatsache zurückzuführen, dass die natürliche potentielle Vegetation noch großräumig vorhanden und nicht durch Kulturlächen verdrängt worden ist.

Das Erscheinungsbild des tropischen Regenwaldes ist hier durch den sogenannten Stockwerksbau geprägt, der sich von der obersten Schicht der Baumkronen über die darunter gelegenen Zonen des Buschwerks und die am tiefsten gelegene Krautschicht erstreckt.

Durch diese verschiedenen Stockwerke, die jeweils andere Umgebungsbedingungen bieten, haben sich hier viele verschiedene spezialisierte Arten entwickelt. So ist eine im Vergleich zu Mitteleuropa, extrem hohe Biodiversität in Flora und Fauna vorhanden. Sie zählt zu den vielfältigsten der Erde.

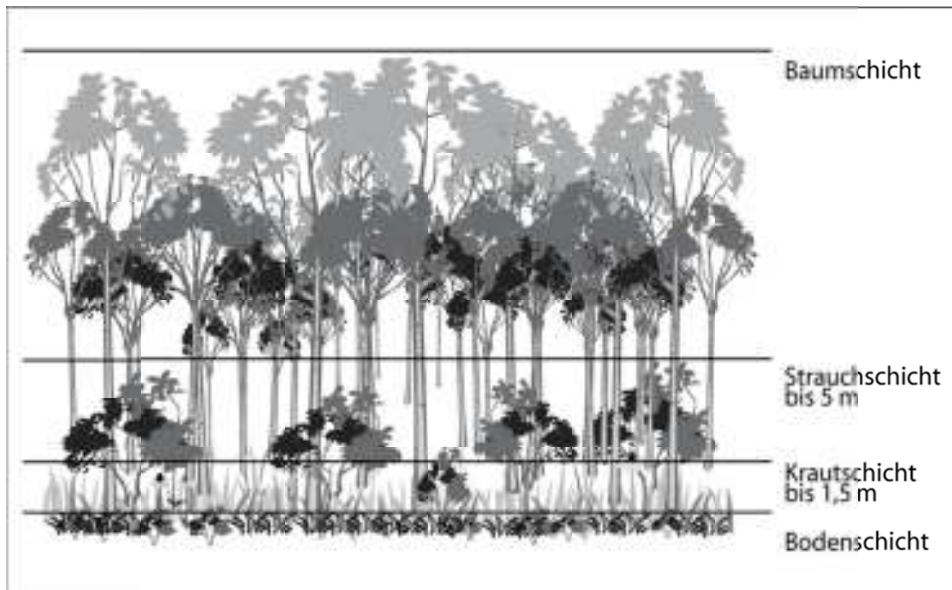


Abbildung 3: Vertikale Gliederung der Vegetation im tropischen Regenwald (Quelle: Wikipedia)

(Diercke Weltatlas, 2002), (Tropischer Regenwald - Wikipedia, 2010), (Wikipedia - Stratifikation)

2.2 Eigenheiten tropischer Hölzer

Betrachtet man auffallende Eigenschaften tropischer Hölzer, so sind schon am Baum als Ganzes Merkmale zu erkennen, die so bei zum Beispiel in Deutschland heimischen Bäumen nicht vorhanden sind oder nicht so ausgeprägt ausfallen.

Bei tropischen Hölzern denkt man normalerweise zuerst an sogenannte „Urwaldriesen“, die einen sehr großen Stammdurchmesser, einen schlanken, geraden Wuchs und, bis auf die Krone, keine Äste besitzen. In der Realität zeichnet sich allerdings ein weitgehend anderes Bild ab. Der Wuchs der Bäume ist, abgesehen von seiner genetischen Veranlagung, offensichtlich auch den von ihm zur Verfügung stehenden Umgebungsbedingungen abhängig und kann deshalb sehr verschiedene Formen annehmen.

Urwaldriesen, wie man sie sich allgemein vorstellt, können in geschlossenen, homogenen Wäldern durchaus vorkommen. Falls aber die gleiche Baumart an einem anderen Standort aufwächst, an dem sie hinsichtlich Sonne, Regen und Wind exponiert ist, bildet sich ein, an diese Bedingungen angepasstes Wuchsbild, wie zum Beispiel ein gekrümmter Stamm oder eine höhere Astigkeit, aus.

Die Höhen der Bäume in tropischen Wäldern können beachtenswert sein. Im Durchschnitt reichen sie allerdings nicht an Extremwerte von Exemplaren mit ca. 100 m Höhe heran. Im peruanischen Amazonasgebiet, das dem Untersuchungsgebiet in Ecuador sehr ähnlich ist, werden die Bäume



Abbildung 4: Urwaldriese

bis zu ca. 44 m hoch. Allerdings erreichen nur einzelne Exemplare diese Höhen. Der Großteil der Bäume wird nur ca. 24 m hoch (Abbildung 4).

Ein weiteres Merkmal der Tropenhölzer ist das Holzbild hinsichtlich Textur und Farbe, welches auch einen Grund für ihre große Beliebtheit darstellt. Generell sind der anatomische Aufbau der Hölzer, sowie der Gehalt an im Holz vorhandenen Stoffen (Öle, Harze, Fette) für außergewöhnliche Färbungen verantwortlich.

Des Öfteren wird auch der homogene Bau der Hölzer, der keine deutlichen Jahrringe aufweist, als auffallende Eigenschaft genannt. Deren Fehlen wird durch das äquatornahe Tageszeitenklima, durch das keine markanten Jahreszeiten vorhanden sind, begründet. Es herrschen während des ganzen

Jahres durchgehend vorteilhafte Wachstumsbedingungen, die eine gleichmäßige Kambiumtätigkeit ohne schlagartiges Ein- und Aussetzen derselben begünstigen.

Allerdings können in tropischen Hölzern sogenannte Wuchsringe auftreten. Diese entstehen durch regionale Unterschiede im Klima – wie etwa Regen- oder Trockenzeiten, in denen der Dickenzuwachs stärker oder schwächer ausfällt. Insofern kann festgehalten werden, dass sich mit ansteigendem Abstand von Zonen, die ein homogenes Klima aufweisen, das Auftreten von Wuchsringen häuft.

Bei weiterer Betrachtung des Holzbildes ist außerdem der Unterschied zwischen Kern- und Splintholz zu beachten. Obwohl das Kernholz sich teils durch die für einige Tropenhölzer typische Farbe und Struktur auszeichnet, gibt es laut Harzmann (1988) auch einen großen Teil von Tropenholzarten, bei denen der Kern nicht deutlich abgezeichnet ist und sich Kern- und Splintholz insgesamt sehr ähnlich sehen.

Neben dem möglichen optischen Unterschied zwischen Kern- und Splintholz, sind weitere Unterschiede zu beachten. Dabei ist als erstes die hohe natürliche Dauerhaftigkeit einiger Kernhölzer hervorzuheben, da bei der Kernbildung sekundäre Produkte des Stoffwechsels abgelagert werden. Diese Kernstoffe können fungizide und insektizide Stoffe enthalten, wodurch sie sich gewissermaßen selbst „imprägnieren“ und auf natürliche Art vor Schädlingen schützen. Das Splintholz hingegen weist keine natürliche Dauerhaftigkeit auf, da keine resistenzwirksamen Inhaltsstoffe vorhanden sind und es sogar für Mikroorganismen nützliche Stoffe wie Zucker und Stärke enthalten kann. Insofern ist es



Abbildung 5: Übergang zwischen Kern- und Splintholz

nicht resistent und wird schnell durch holzverfärbende und holzerstörende Pilze befallen, die es als Nutzholz unbrauchbar machen können. Hinsichtlich der Festigkeits- und Steifigkeitswerte sind allerdings keine solch signifikanten Unterschiede beschrieben, diese sind bei Kern- und Splintholz im Allgemeinen recht ähnlich.

Es gibt noch weitere wichtige Größen, mit denen tropische Holzarten charakterisiert werden können. Zuerst ist hier die Dichte zu nennen. Im Bereich der tropischen Hölzer ist vor allem die große Varianz der Rohdichte bemerkenswert. So werden von Harzmann (1988) Rohdichten zwischen 0,05 und 1,5 g/cm³ beschrieben. Hölzer der gemäßigten Klimazone weisen dagegen sogar im Extremfall nur Rohdichten von 0,3 bis zu 0,9 g/cm³ auf. Da die Dichte im Allgemeinen einen wesentlichen Einfluss auf andere Eigenschaften der Holzarten, wie zum Beispiel Härte, Festigkeit, Bearbeitbarkeit und Dauerhaftigkeit hat, ist durch die oben beschriebene Varianz auch ein wesentlich größeres Spektrum unterschiedlicher Holzeigenschaften gegeben. Als Beispiel kann die physische Beanspruchbarkeit des Holzes genannt werden, die im Normalfall mit der Dichte des Holzes steigt. Insofern kann bei der Konstruktion der Brücke davon ausgegangen werden, dass auch Hölzer zur Verfügung stehen, die deutlich bessere Eigenschaften aufweisen, als die eines bei uns üblichen Nadelholzes der Festigkeitsklasse C24.



Abbildung 6: Termiten

Betrachtet man tropische Hölzer hinsichtlich Holzschädigungen, so ist in erster Linie der große Artenreichtum der tropischen Gebiete in Betracht zu ziehen. Durch die große Anzahl von sowohl Holzarten und auch von schädigenden Organismen, ist eine sehr große Differenzierung der verursachten Holzschädigungen und Anfälligkeit gegenüber Schädlingen gegeben.

Die hauptsächlichen Schadenserreger sind holzbohrende Insekten (Lyctus-Käfer, Teredo-Arten, Schmetterlinge, Termiten) und Pilze (Poria-, Lentinus-, Fomes-, Polyporus-, Pycnoporus-, Ganoderma-Arten) die eine Holzfäule oder Holzverfärbung hervorrufen. Durch Insekten wird vor allem bei gefälltten Hölzern zuerst das Splintholz befallen, wobei es auch Insekten gibt, die sich auf den Kernholzbereich spezialisiert haben. Während die Holzschädigung

durch Insekten und andere Tiere an Bohrlöchern bzw. Fraßgängen zu erkennen ist, zeigt sich die Schädigung bei Pilzbefall primär durch Holzverfärbungen (holzbewohnende Pilze) oder durch Fäule (holzerstörende Pilze). Ein großes Problem hinsichtlich des Pilzbefalls stellt laut Harzmann (1988) die Tatsache dar, dass in unerschlossenen Tropenwäldern teilweise die Hälfte der geschlagenen Stämme eine Kernfäule vor allem im unteren Stammbereich aufweist. Als Ursache wird die Verjüngung der Stämme durch Stockausschlag genannt, wobei auch die in Bodennähe größere Feuchtigkeit ausschlaggebend sein kann. In vielen Fällen wird die Kernfäule außerdem durch Termiten unterstützt und so Tempo und Ausmaß der Holzzerstörung verstärkt.

Weiterhin handelt es sich bei den in tropischen Gebieten beheimateten Baumarten meist um Laubhölzer, obwohl tropische Nadelhölzer durchaus auch bekannt sind. Der Begriff Tropenholz bezeichnet allerdings im Allgemeinen das Kernholz tropischer Laubhölzer, das etliche anatomische Unterschiede zu dem der Nadelhölzer aufweist, die in Europa meist verwendet werden.

Nadelhölzer besitzen generell nur zwei Zellarten (Tracheiden, Parenchymzellen), deren Zellaufbau in tropischen Gebieten nur relativ gering variiert. Dies ist auf das gleichmäßige Klima zurückzuführen, wobei trotzdem Unterschiede zwischen Früh- und Spätholz auftreten können.

Die entwicklungsgeschichtlich jüngeren Laubhölzer sind in ihrem Zellaufbau wesentlich stärker differenziert als die älteren, anatomisch einfacher aufgebauten Nadelhölzer. Man kann ihren Aufbau in drei funktionale Gruppen unterteilen (Leitgewebe, Festigungsgewebe, Speichergewebe), die aus jeweils verschiedenen Zellen (u.a. Tracheen, Tracheiden, Librifasern, Holzstrahlenparenchymzellen, Epithelzellen) aufgebaut sind. Bei tropischen Laubhölzern ist die Struktur allerdings überwiegend zerstreutporig, der Anteil ringporiger Hölzer ist im Vergleich zu Europa relativ selten. Da Zusammenhänge zwischen Anatomie und Holzeigenschaften bei zerstreutporigen Hölzern insgesamt komplizierter und weniger aufgeklärt sind, ist der Aufbau tropischer Hölzer generell schwerer überschaubar.

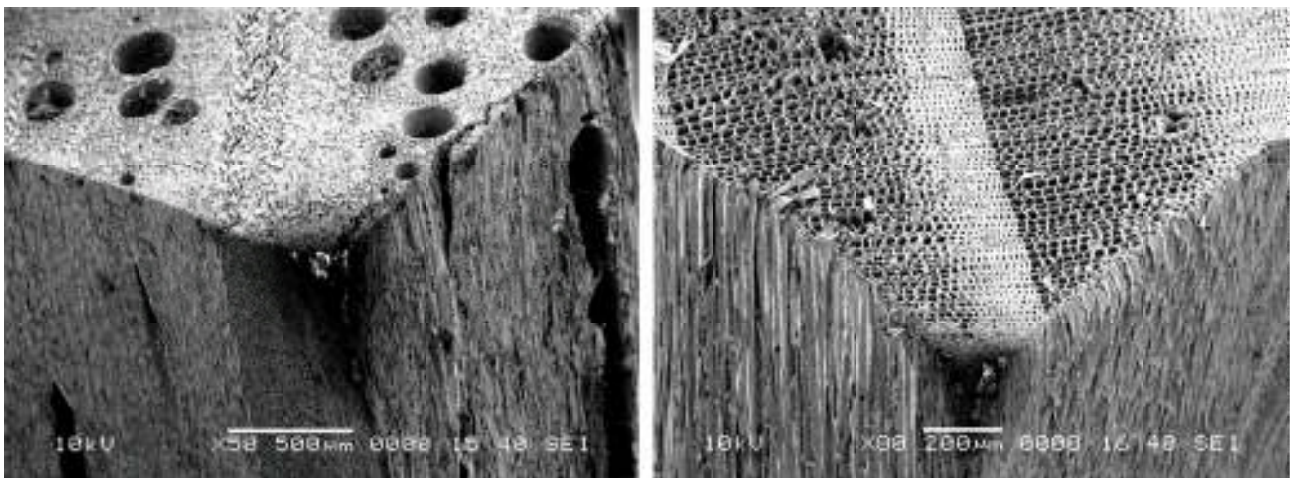


Abbildung 7: Struktur eines Laubholzes (links) und eines Nadelholzes (rechts) im Rasterelektronenmikroskop (Quelle: Wikipedia)

Insgesamt sind also in mehreren Bereichen Unterschiede zwischen tropischen Hölzern und den in Europa beheimateten Laub- und Nadelhölzern festzustellen, aus denen auch die besonderen Vorzüge und Eigenschaften dieser Tropenhölzer abzuleiten sind.

(Harzmann, 1988), (Mombächer, 1962), (Wagenführ A. , 2008), (Wikipedia - Holz, 2010)

3 Untersuchungen vor Ort

Um die für die Planung der Brücke erforderlichen Daten zu sammeln und sich einen Überblick über die tatsächliche Situation vor Ort zu schaffen, war es von vornherein unumgänglich, Untersuchungen im ecuadorianischen Regenwald durchzuführen. Neben der Begehung und Vermessung des zukünftigen Standorts sind für diese Arbeit natürlich vor allem holztechnische Untersuchungen relevant.

Aufgrund des engen zeitlichen Rahmens, in dem die Untersuchungen stattfinden mussten, war es nötig sich auf wenige, dafür aber aussagekräftige Teilbereiche zu konzentrieren. Diese müssen eine ausreichende Einschätzung der für den Bau der Brücke zu verwendenden Hölzer zulassen.

Wichtig war vor allem, die Verfügbarkeit der Hölzer einschätzen zu können, da, wie anfangs erwähnt, ein Transport über weite Strecken erhebliche Kosten verursacht, sofern er überhaupt möglich ist. Dazu war es notwendig auf das Wissen der ortsansässigen Indios zurückzugreifen, die bestens einschätzen konnten, welche Hölzer zur Verfügung stehen und mit welcher Häufigkeit sie im betrachteten Gebiet vorkommen.

Auch bei der Untersuchung der Festigkeit, der Dauerhaftigkeit, des Verhaltens gegenüber Feuchte und der Bearbeitbarkeit wurde auf die Erfahrung der Indios zurückgegriffen. Denn einerseits waren keine Langzeitversuche zur Analyse der Dauerhaftigkeit möglich und andererseits konnte, zum Beispiel die Festigkeit, nur an einer begrenzten Anzahl von Versuchskörpern erprobt werden – was die gewonnenen Werte nur bedingt aussagekräftig macht. Dieses Kapitel beschreibt allerdings nicht nur die tatsächlich vor Ort gewonnenen Ergebnisse, sondern stellt sie zudem teilweise in einen Kontext zu Angaben aus der Literatur.

3.1 Verfügbare Hölzer

In der folgenden Tabelle 1 sind die verschiedenen Holzarten, die laut den Indios in der Nähe des Bauplatzes verfügbar sind und bereits als Baumaterial benutzt werden bzw. wurden, aufgelistet. Es konnten vor Ort nur die spanischen Bezeichnungen der Holzarten und die Namen in Achuar, der Sprache der Indios, bestimmt werden. Die Namen in Achuar sind aufgelistet um die Kommunikation beim zukünftigen Bau der Brücke zu erleichtern. Soweit möglich sind zusätzlich allgemein bekannte und botanische Bezeichnungen der jeweiligen Holzart angegeben.

Die Einordnung der aufgeführten Hölzer ist mit Vorsicht zu betrachten, da es nicht möglich war, eine genaue Klassifizierung der Hölzer in botanischer Hinsicht vorzunehmen. Proben der Hölzer wurden zwar an die Holzforschung München zur anatomischen Untersuchung weitergegeben, allerdings konnten bis zum Abgabetermin dieser Arbeit aus Zeitgründen keine Ergebnisse der Holzforschung miteingearbeitet werden. Aufgrund der bekannten spanischen Namen, bei denen es sich zwar um lokale Bezeichnungen handelt, konnte trotzdem bei den meisten Hölzern mit

großer Sicherheit die tatsächliche Holzart bestimmt werden. Genauere Informationen hierzu finden sich in der detaillierten Beschreibung der Hölzer in Kapitel 4.

Tabelle 1: Auflistung der vorgefundenen Hölzer

| Lokale Bezeichnung | Alternative und botanische Bezeichnungen | Name in Achuar |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Abiu | <i>Pouteria caimito</i> | Yaasnumi |
| Balsamo | Balsambaum, <i>Myroxylon balsamum</i> | Chikeina |
| Bambú (Bambus) | <i>Bambuseae</i> | Kenku |
| Canelo | Louro, <i>Nectandra</i> spp., <i>Ocotea</i> spp. | Eavua |
| Cedro macho | Andiroba, <i>Carapa guianensis</i> | Canu Sai |
| Chonta-Palme | Pfirsichpalme, <i>Bactris gasipaes</i> | Tuntuam |
| Guayabillo | Tanimbuca, <i>Terminalia</i> spp. | Karusha |
| Guayacan | Ipè, <i>Tabebuia</i> spp. | Pakia |
| Huambula | Black Manwood, <i>Minquartia guianensis</i> | Paini |
| Laurel | evtl. <i>Laurelia aromatica</i> , die gemessenen Kennwerte stimmen allerdings nicht mit Literaturwerten überein. | Ararats |
| Pechiche | Keine genaue Zuordnung möglich, siehe Kapitel 4 | Tsapa Numi |
| Tucuta | <i>Guarea guidonia</i> , <i>Guarea excelsa</i> | Wapacham Suki |

Neben dem generellen Vorkommen der Baumarten wurde weiterhin auch die Häufigkeit mit der diese zu finden sind beurteilt. Dazu wurden die Indios aufgefordert, die einzelnen Holzarten als „gut“, „mittelmäßig“ oder „schlecht“ auffindbar einzuordnen. Diese Ergebnisse sind insbesondere hinsichtlich eines nachhaltigen Brückenbaus, bei dem möglichst wenige der selteneren Hölzer gefällt werden sollen, interessant (Tabelle 2).

Tabelle 2: Verfügbarkeit der vorgefundenen Hölzer

| häufig | neutral | selten |
|--------------|-------------|----------|
| Balsamo | Cedro macho | Abiu |
| Bambú | | Guayacan |
| Canelo | | Huambula |
| Chonta-Palme | | Pechiche |
| Guayabillo | | |
| Laurel | | |
| Tucuta | | |

3.2 Festigkeit bzw. Steifigkeit

Um die Festigkeit und Steifigkeit der Hölzer vor Ort ingenieurtechnisch einschätzen zu können, erwies sich die Bestimmung des Elastizitätsmoduls als am besten geeignet, da sich von dieser Zeigergröße auf weitere mechanische Festigkeiten schließen lässt. Vergleicht man die Festigkeiten von Nadel- und Laubhölzern nach deutscher Normung mit ihrem Elastizitätsmodul, so lässt sich erkennen, dass diese Werte in Beziehung zueinander stehen – mit steigendem Elastizitätsmodul nehmen auch die Schub-, Druck- und Torsionswiderstände größere Werte an. Zu dieser Aussage muss allerdings bemerkt werden, dass die Zusammenhänge sowohl zwischen verschiedenen Holzarten, als auch innerhalb einer Art stark variieren können. Insofern kann anhand dieser Werte letztendlich nur eine Empfehlung hinsichtlich der anzunehmenden Festigkeitswerte ausgesprochen werden. (DIN 1052, 2008), (Ravenshorst, van der Linden, Vrouwenfelder, & van de Kuilen, 2004)

Es konnten relativ gleichmäßige Querschnitte mit Längen von 2 bis 3 m hergestellt werden. Diese wurden als Einfeldträger mit drei unterschiedlich schweren Gewichten mittig belastet, so dass die Durchbiegung in Feldmitte gemessen werden konnte. Stellt man die Berechnungsformel für die Durchbiegung des mittig belasteten Einfeldträgers um, so kann der Elastizitätsmodul (unter Vernachlässigung des Schubeinflusses) berechnet werden:

$$E = \frac{F * L^3}{48 * w * I}$$

mit: E = Elastizitätsmodul, F = Last, L = Abstand der Auflager, w = gemessene Durchsenkung, I = Flächenträgheitsmoment



Abbildung 8: Durchführung des Biegeversuchs

jeweilige Last wurde bestimmt, indem zuerst die Höhe über einem Fixpunkt im unbelasteten und dann im belasteten Zustand abgemessen wurde.

Zur Durchführung des Versuchs stand nur rudimentäre Ausrüstung bereit, da es keine Möglichkeit gab große oder schwere Messgeräte anzutransportieren. Die Auflager bestanden aus jeweils zwei aufeinandergestapelten Holzquadern, auf denen der jeweilige Probekörper als Einfeldträger horizontal gelagert war. Die Belastung in Trägermitte erfolgte durch Personen, deren Gewicht zuvor bestimmt worden war. Die vertikale Verschiebung der Kantholzoberkannte in Trägermitte durch die

Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, wurden von jeder Holzart zwei Kanthölzer geprüft. Außerdem wurden bei allen Probekörpern sowohl die starke, als auch die schwache

Achse belastet um ein größeres Spektrum an Ergebnissen zu erzielen. Aus den so berechneten zwölf verschiedenen Werten pro Holzart wurde anschließend der Mittelwert berechnet. Die Ergebnisse der Biegeversuche sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Querschnittswerte der Probekörper und Ergebnisse des Versuchs sind im Anhang dargestellt.

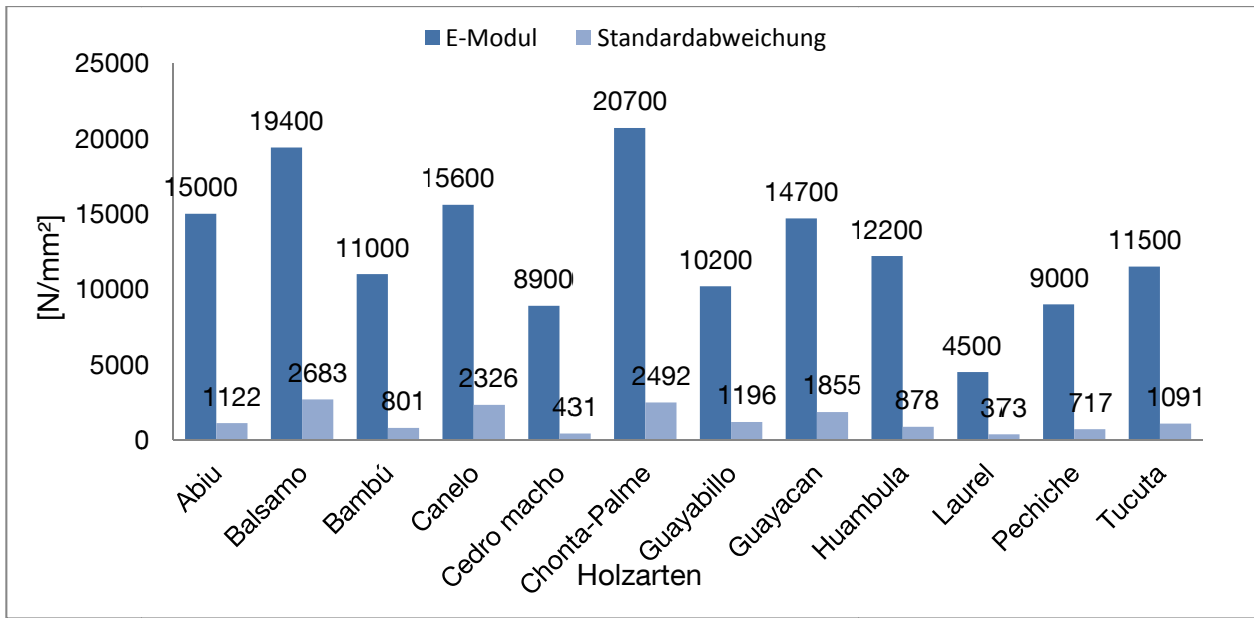


Abbildung 9: Ergebnisse des Biegeversuchs vor Ort

Die erzielten Ergebnisse sind allerdings nur bedingt vergleichbar, da die Holzfeuchte der Proben zum Zeitpunkt der Messung variierte. Der im Nachhinein durch Darrtrocknung gemessene relative Feuchtegehalt ist in Abbildung 10 dargestellt. Im Allgemeinen verschlechtern sich die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften mit steigender Feuchtigkeit. Deshalb kann vor allem bei den Hölzern deren Feuchtigkeit überdurchschnittlich hoch ist, davon ausgegangen werden, dass der Elastizitätsmodul im trockeneren Zustand einen höheren Wert aufweisen würde.

Nach Kollmann (1982) ist im hygrokopischen Bereich je 1 % Feuchtigkeitsabnahme mit durchschnittlich 2 % Abnahme des Elastizitätsmoduls zu rechnen (Großzahlforschung, die sich allerdings nicht explizit auch auf tropische Hölzer bezieht). Da sowohl zum Fasersättigungspunkt als auch zur voraussichtlichen Ausgleichsfeuchte der Hölzer teilweise nur ungenaue Daten zur Verfügung stehen, wird hier auf eine Anpassung der Werte verzichtet. Ginge man allerdings von einem mittleren Fasersättigungspunkt bei etwa 25 % Holzfeuchte aus, ein Wert der für tropische Hölzer durchaus realistisch ist und einer Gleichgewichtsfeuchte von ca. 18 % (Wert nach Harzmann (1988) unter heißfeuchten Bedingungen: 30 °C und 85 % Luftfeuchte), so wäre mit einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls von ungefähr 14 % zu rechnen. Bei der Angabe des oben genannten Wertes bezieht sich Harzmann auf modifizierte Sorptionsthermen der Sitkafichte, aus denen sich Holzfeuchten für unterschiedliche Bedingungen in tropischen Gebieten ableiten lassen. Diese hohe Feuchtigkeit des Holzes sollte auch bei der Berechnung des Eigengewichts

der Brückenbauteile berücksichtigt werden, da durch einen höheren Wassergehalt das Holz bekanntlich schwerer wird.

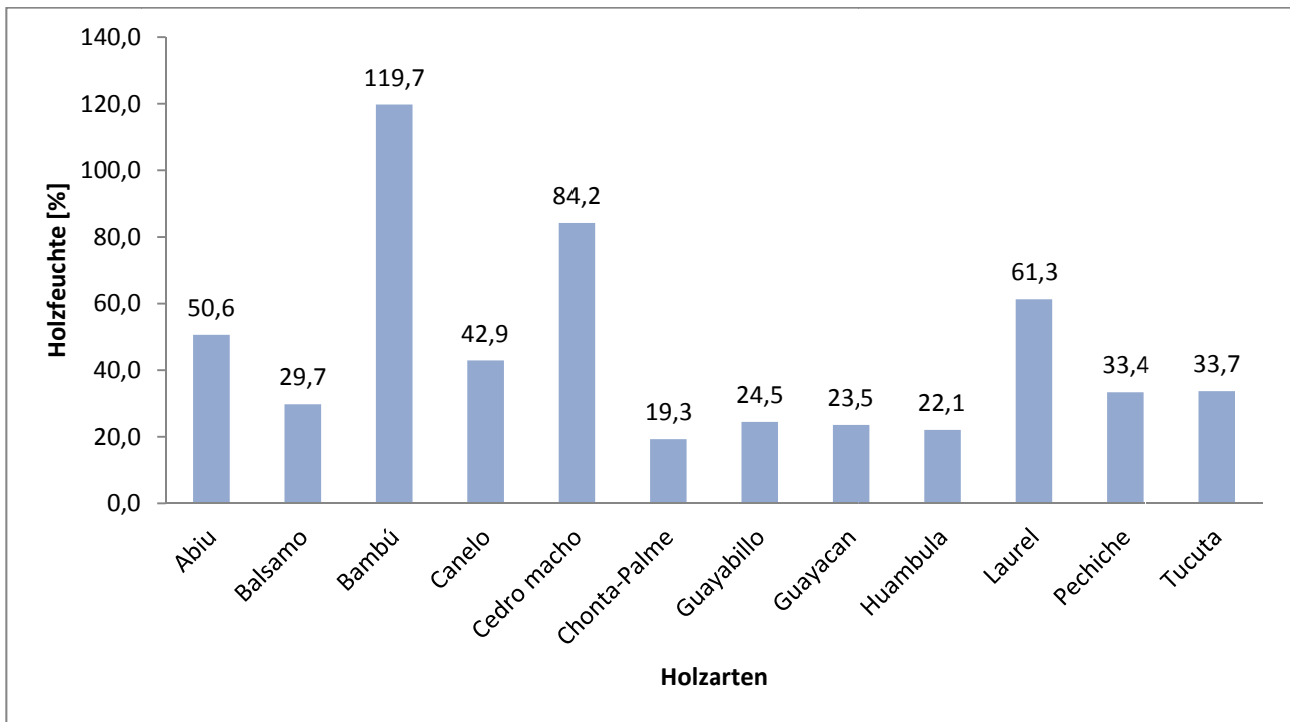


Abbildung 10: Holzfeuchte der Proben

Die große Varianz der Holzfeuchten in Abbildung 10 ist einerseits auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Hölzer und andererseits auf das Alter bzw. die Lagerung der verschiedenen Hölzer zurückzuführen. Einige stammten aus dem Abrissmaterial eines Hauses und waren schon mehrere Jahre alt während andere aus erst kürzlich gefällten Bäumen stammten. Es war weiterhin nicht bekannt, wann die Bäume gefällt worden waren und ob bereits zugeschnittenes Holz (zum Beispiel aus Abrissmaterial) überdacht oder frei bewittert gelagert wurde.

3.3 Quellen und Schwinden

Auch mit Hilfe der Werte aus Abbildung 10 soll das Quell- und Schwindverhalten der einzelnen Hölzer tendenziell beschrieben werden, da es für die Planung der nötigen Holzverbindungen der Brückenkonstruktion eine wichtige Rolle spielt. Da auch Tropenholz in verschiedene Richtungen (längs, tangential, radial) unterschiedlich stark schwindet, können sich außerdem Verformungen (Schwindrisse, Krümmung, Verdrehungen) an größeren Bauteilen einstellen.

Das Quellen und Schwinden von Holz erfolgt aufgrund von Ab- und Zunahme der Feuchte unterhalb des Fasersättigungspunktes, da sich nur in diesem Bereich eine wesentliche Änderung des Volumens einstellt, deren Verlauf allerdings als linear angenommen werden kann. Möchte

man prozentuale Werte der Volumenänderung festlegen, so müssen Eigenschaften des Materials und Umgebungsbedingungen in Betracht gezogen werden. Einerseits muss die Differenz zwischen Holzfeuchte bei Fasersättigung und der Ausgleichsfeuchte, die vom jeweiligen Umgebungsklima abhängt, bestimmt werden. Des Weiteren müssen entweder die Schwindmaße je 1 % Feuchteabnahme oder die prozentualen Schwindsätze, die sich auf den gesamten Bereich zwischen darr trockenem und fasergesättigtem Zustand beziehen, bekannt sein.

Die bekannten Holzfeuchten bei Fasersättigung der vorliegenden Hölzer liegen im Bereich zwischen 20 % und 27 %, sind also insgesamt niedriger als bei europäischen Hölzern, deren Holzfeuchten bei Fasersättigung laut Wagenführ A. (2008) zwischen 28 % und 32 % liegen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Gleichgewichtsfeuchte der in der Brücke verbauten Hölzer aufgrund des Klimas wesentlich höher ist, als es in Europa anzunehmen wäre. Zuvor wurde schon der Wert von 18 % genannt, der allerdings nicht als definitiv angesehen werden kann, da sich je nach Holzart eine andere Ausgleichsfeuchte einstellen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass aufgrund der vergleichsweise kleinen Differenz zwischen Gleichgewichtsfeuchte und Fasersättigungsfeuchte mit einem geringen Schwinden des Holzes zu rechnen ist. Weiterhin ist aufgrund des konstanten Klimas davon auszugehen, dass der Wassergehalt des Holzes, sobald sich die Ausgleichsfeuchte eingestellt hat, nicht mehr stark variiert. Als Möglichkeit, den Einfluss von Quellen und Schwinden auf die Brückenkonstruktion zu verringern, wird hier deshalb vorgeschlagen, die Hölzer nach dem Fällen ausreichend lange lagern zu lassen. So würde sich eine konstante Ausgleichsfeuchte einstellen, durch die weiteres Quellen und Schwinden ausgeschlossen werden kann. Aufgrund des Klimas am Bauplatz würde ein solches Vorgehen allerdings viel Zeit in Anspruch nehmen und wäre daher nur bedingt praktikabel. (Kollmann, 1982)

3.4 Dauerhaftigkeit

Bei der Planung der Brücke spielt die Dauerhaftigkeit der verwendeten Bauhölzer eine wichtige Rolle. Wie oben erwähnt ist im tropischen Regenwald eine Vielzahl von holzschädigenden Organismen vorhanden. Das Splintholz weist im Normalfall keine natürlichen Resistenzen gegen Schädlinge auf, insofern beziehen sich die folgenden Angaben auf das Kernholz.

Durch die großen Niederschlagsmengen und die hohe Luftfeuchtigkeit ist abzusehen, dass die Hölzer eine hohe Ausgleichsfeuchte aufweisen (Berechnung mit Nutzungsklasse 3, da Luftfeuchte >85%). Nach europäischen Maßstäben besteht deshalb die Gefahr, dass das Holz durch Pilze befallen und durch eine daraus resultierende Fäule (zum Beispiel Braunfäule, Weißfäule, Moderfäule) geschädigt wird. Deshalb muss bei der Materialwahl beachtet werden, dass tragende Bauteile, die ständig beregnet sind oder mit dem Boden in Kontakt kommen, entweder konstruktiv oder durch ihre natürliche Resistenz der jeweiligen Bedingung angepasst werden.

Da die Indios seit Generationen mit den vorgefundenen Hölzern unter genau den Bedingungen arbeiten, denen die Brücke ausgesetzt ist, wurden mit ihrer Hilfe Prognosen zur ungefähren Lebensdauer der vorgefundenen Holzarten ermittelt. Dabei wurde zwischen drei verschiedenen Bedingungen unterschieden:

- Das verbaute Holz ist nicht überdacht und somit frei bewittert. Durch den regelmäßigen Niederschlag ist zu erwarten, dass sich eine Feuchte oberhalb der Gleichgewichtsfeuchte einstellt.
- Das verbaute Holz ist überdacht und wird weder durch Regen noch durch Bodenkontakt befeuchtet. Somit wird sich auf Dauer die Gleichgewichtsfeuchte einstellen.
- Das Holz ist entweder im Boden eingegraben oder bodennah verbaut. Aufgrund der Feuchte des Bodens wird auch hier die Feuchte des Holzes über der Gleichgewichtsfeuchte liegen

Die so gewonnenen Ergebnisse können prinzipiell mit einem Langzeitversuch gleichgesetzt werden, da hier das Wissen von mehreren Indios, die seit Generationen mit den aufgeführten Hölzern vertraut sind, zusammengefasst wird. Andererseits sind die Werte natürlich vollkommen empirisch und deshalb muss bei wissenschaftlicher Betrachtung von einer gewissen Varianz ausgegangen werden. Es erscheint außerdem sinnvoll, die Ergebnisse nicht hinsichtlich der absoluten Zahlenwerte, sondern in Relation zueinander und zu betrachten und die Holzarten so bezüglich ihrer generellen Dauerhaftigkeit einzuschätzen.

Insgesamt stellen die Ergebnisse in jedem Fall eine gute Arbeitsgrundlage dar, auf der die Bauhölzer letztendlich für jeweils verschieden beanspruchte Bauteile ausgewählt werden können. Die Ergebnisse decken sich zudem bis auf geringe Abweichungen mit Angaben aus der Literatur.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 abgebildet. Interessant ist hier, dass die Haltbarkeit einiger Hölzer im feuchten größer als im trockenen Zustand ist. Dies ist laut den Indios darauf zurückzuführen, dass die jeweiligen Hölzer bei Feuchtigkeitsentzug stark schwinden und somit Risse im Holz entstehen. Allerdings ist es fraglich, ob diese Aussage so festgehalten werden kann, da ein trockenes Holz generell haltbarer ist als feuchtes. Auch in der Literatur konnten keine Angaben dazu gefunden werden.

Neben den Hölzern, die eine hohe Dauerhaftigkeit aufweisen, existieren allerdings zahlreiche, die nur wenige Jahre nutzbar sind. Diese Hölzer sind für den Bau natürlich weniger gut geeignet. Um die wertvollen Hölzer sparsamer einsetzen zu können, ist es dennoch vorstellbar diese Hölzer so einzusetzen, dass sie einerseits nicht für tragende Bauteile verwendet werden und andererseits nicht direkt bewittert sind. Sie sollten demzufolge nur als Sekundärbauteile eingesetzt werden.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass offensichtlich widerstandsfähige Hölzer vorhanden sind, mit denen die Brücke auch unter den widrigen Umgebungsbedingungen (hohe Luftfeuchte, Vielzahl von schädlichen Organismen) des Standortes konstruiert werden kann.

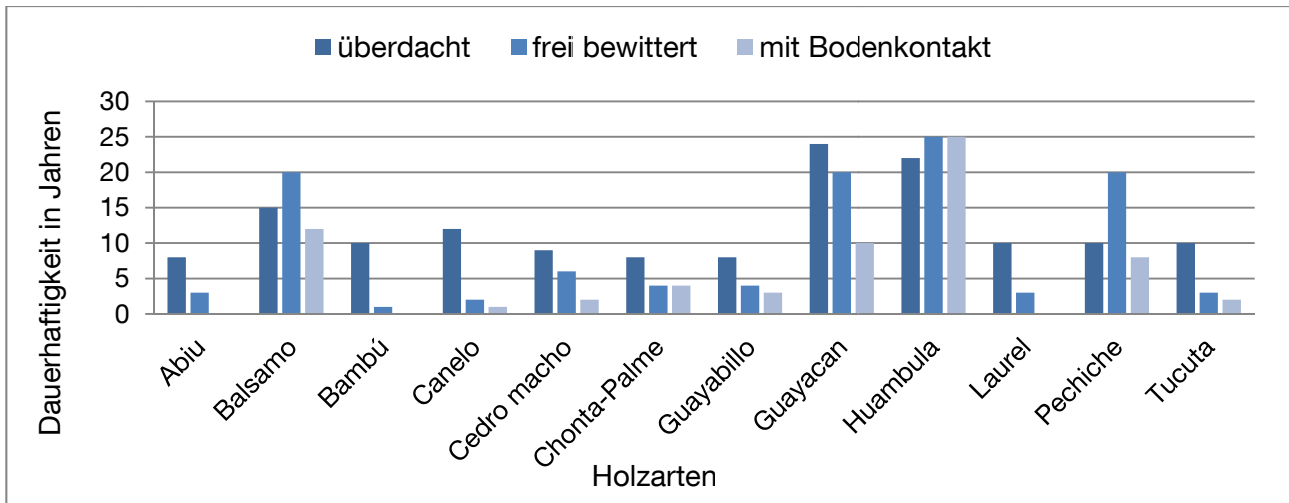


Abbildung 11: Dauerhaftigkeit der Hölzer nach Einschätzung der Indios

3.5 Bearbeitbarkeit und mögliche Querschnittsgrößen

Bei der Untersuchung zur Bearbeitbarkeit der Hölzer wird im Folgenden zwischen zwei verschiedenen Gesichtspunkten unterschieden. Einerseits stellt sich die Frage, wie schwer es ist die Hölzer zu fällen und zuzuschneiden. Weiterhin ist für die Konstruktion der Brücke wichtig, wie genau vor Ort tatsächlich gearbeitet werden kann und welche Querschnittsformen möglich sind. Dies hängt wesentlich von der handwerklichen Geschicklichkeit und den vorhanden technischen Geräten ab.

Die Einschätzungen der Indios, wie gut die verschiedenen Hölzer zu bearbeiten sind, ist in Tabelle 3 dargestellt. Hier wurde zwischen „gut bearbeitbar“, „mittelmäßig bearbeitbar“ und „schlecht bearbeitbar“ unterschieden, um einen ungefähren Eindruck des voraussichtlichen Arbeitsaufwandes zu bekommen. Generell sind natürlich Hölzer mit einer höheren Dichte schwerer bearbeitbar und beanspruchen so einen höheren Arbeits- und Zeitaufwand. Diese Aussage korreliert auch größtenteils mit den Ergebnissen in Tabelle 3. (Harzmann, 1988)

Tabelle 3: Bearbeitbarkeit der Hölzer

| gut bearbeitbar | mittelmäßig | schlecht bearbeitbar |
|-------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Bambú Canelo Chonta-Palme Laurel | Tucuta | Abiu Balsamo Cedro macho Guayabillo Guayacan Huambula Pechiche |



Hinsichtlich der möglichen Querschnittsgrößen lässt sich festhalten, dass Querschnitte mit Durchmessern von bis zu 20 cm und Längen von bis zu 3 m mit Sicherheit herstellbar sind. Die Beobachtungen vor Ort lassen aber darauf schließen, dass auch längere und dickere Querschnitte hergestellt werden könnten. Vom handwerklichen Geschick her stellt das Zuschneiden der Balken kein Problem dar, sofern Abweichungen in Breite und Höhe von ca. 1 cm über die Länge des Balkens toleriert werden können. Ist an bestimmten Stellen (zum Beispiel Verbindungen) eine höhere Genauigkeit erforderlich, so kann diese erreicht werden, was aber den Zeitaufwand der Herstellung vergrößert.

4 Detaillierte Auflistung und Vergleich der verfügbaren Hölzer

Der erste Teil dieses Kapitels charakterisiert die verfügbaren Hölzer jeweils kurz hinsichtlich ihrer verschiedenen Eigenschaften. Außerdem wird beschrieben, ob und wie es möglich war die Hölzer zu bestimmen. Da für die Konstruktion der Brücke später in erster Linie die spanischen Namen wichtig sind (Kommunikation vor Ort) werden die Hölzer im Weiteren auch mit diesen bezeichnet. Eine Ausnahme bildet nur die Chonta-Palme, deren Name teilweise übersetzt wurde.

Anschließend werden die Hölzer kurz miteinander verglichen um festzustellen, welche Hölzer generell für den Einsatz als Bauholz sinnvoll erscheinen und welches Holz jeweils für bestimmte Bauteile in Frage kommt. Für die Hölzer, die sich als geeignet erweisen, wird außerdem genauer auf wichtige Eigenschaften wie Steifigkeit, Festigkeit und Schwindverhalten eingegangen.

4.1 Auflistung und Beschreibung der Hölzer

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Hölzer aufgelistet und im Text bezüglich genereller Eigenschaften beschrieben. Desweiteren sind wichtige Kennwerte aus der Literatur in Tabellenform dargestellt und Aufnahmen der Holzstruktur abgebildet.

Bei den Literaturkennwerten zu Dichte, Steifigkeit und Festigkeit handelt es sich generell um Mittelwerte, die sich auf das jeweilige Kernholz bei einer Holzfeuchte von etwa 12-15 M-% beziehen. Die angegebenen Schwindmaße beschreiben den Bereich zwischen der Feuchte, die das Holz bei fasergesättigtem Zustand aufweist und dem darrtrockenen Zustand, bei dem kein Wasser mehr im Holz vorhanden ist.

Die folgenden Informationen sollen allerdings vorerst nur eine allgemeine Beschreibung der Holzarten darstellen, um sie anschließend hinsichtlich ihrer generellen Brauchbarkeit und ihrer Tauglichkeit für verschiedene Beanspruchungsarten einschätzen zu können. Detaillierte Angaben werden anschließend für ausgewählte Hölzer dargelegt.

4.1.1 Abiu

Bei Abiu handelt es sich offenbar um eine Baumart, die in Ecuador vor allem wegen ihrer Früchte von Bedeutung ist. Literaturwerte hinsichtlich der Eigenschaften als Baustoff konnten nicht recherchiert werden. An einem Probekörper wurde eine Darrdichte von ca. $0,95 \text{ g/cm}^3$ gemessen.

Laut der Indios ist Abiu ein wenig haltbares Holz, das vor allem bei Feuchte und Bodenkontakt schnell an Brauchbarkeit verliert. Es ist außerdem schwer zu bearbeiten und kommt selten vor. Aufgrund der relativ hohen Rohdichte wäre es aber interessant, diese Aussagen durch einen Langzeitversuch zu überprüfen.

Ohne weitere Untersuchungen sollte den Erfahrungen der Indios vertraut, und die Brücke nicht mit Abiu konstruiert werden.



Abbildung 12: Abiu Längs- und Querschnitt

(Pouteria caimito - Wikipedia, 2010)

4.1.2 Balsamo

Im Deutschen wird diese Holzart als Balsambaum bezeichnet. Sowohl die gemessene Steifigkeit, als auch die Darrdichte ($1,00 \text{ g/cm}^3$) und der aromatische Geruch eines Probekörpers lassen auf eine korrekte Bestimmung schließen. Es handelt sich um ein sehr hartes Holz, dessen Steifigkeit bei einem Feuchtegehalt von ca. 12% außergewöhnlich hoch ist. Ähnlich gute Eigenschaften weist nur Guayacan auf.

Balsamo ist ein schwer zu bearbeitendes Holz, kommt aber im Baugebiet häufig vor. Die Resistenzen sind laut den Indios überdurchschnittlich. Vor allem im feuchten Zustand hält das Holz länger als im Trockenen. Das Holz ist nach deutscher Norm nicht klassifiziert. Allerdings ist aufgrund der annähernd gleichen physikalischen Eigenschaften anzunehmen, dass es in eine ähnliche Festigkeitsklasse wie Guayacan einzuordnen wäre.

Durch seine hohe Festigkeit und die gute Verfügbarkeit sollte Balsamo unbedingt für die Brücke eingesetzt werden, da es das einzige Holz ist, bei dem diese beiden Eigenschaften zusammentreffen. Es ist auf jeden Fall für tragende Bauteile geeignet und aufgrund seiner auch im feuchten Zustand guten Resistenzen ist eine Überdachung nicht notwendig.

Tabelle 4: Literaturkennwerte Balsamo

| | | | |
|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Rohdichte ρ_{12-15} : | $0,93 \text{ g/cm}^3$ | E-Modul: | 16800 N/mm^2 |
| Schwindmaß | | Biegefestigkeit σ_{bB} : | ca. 150 N/mm^2 |
| radial ρ_r : | 4 % | Druckfestigkeit σ_{zB} : | Ca. 82 N/mm^2 |
| tangential ρ_t : | 6 % | | |



Abbildung 13: Balsamo Längs- und Querschnitt

(Woodworkers Source, 2010), (Balsambäume - Wikipedia, 2010)

4.1.3 Bambú

Bei dem vorgefundenen Bambú bzw. Bambus handelt es sich um ein verholztes Riesengras, in dessen Halmen die Zellen eine große Menge an Lignin enthalten. So ist es in vielen Eigenschaften den Harthölzern ähnlich. Da die genaue Art des vorgefundenen Bambus nicht bestimmt werden konnte, ist es schwer Vergleiche mit Festigkeitswerten aus der Literatur heranzuziehen, da sogar innerhalb einer Art eine große Streuung der Werte möglich ist.

Bambus ist leicht zu bearbeiten und kommt im Baugebiet häufig vor. Er ist unbehandelt allerdings sehr schlecht haltbar. Vor Ort konnte überdacht verbauter Bambus begutachtet werden, der im Vergleich zu anderen, an selber Stelle verbauten Hölzern, viele Bohrlöcher von Insekten und Pilzbefall aufwies. Eine Vorbehandlung des Holzes kann chemisch erfolgen, inzwischen werden Möglichkeiten der Behandlung mit Borsalz erprobt. Auch die gemessene Steifigkeit von 11000 N/mm^2 deutet nicht auf eine überdurchschnittlich gute Eignung als Bauholz hin. Trocknet man Bambus, sollte das langsam und vorsichtig geschehen, da sich sonst Risse bilden können. Dies ist auch auf die hohe Feuchtigkeit des Materials im frisch geschlagenen Zustand zurückzuführen (vgl. Abbildung 10).

Für tragende Elemente der Brücke ist Bambus wenig geeignet, was in erster Linie auf die schlechten Dauerhaftigkeitseigenschaften zurückzuführen ist und die chemische Behandlung vor Ort aufwändig wäre. Auch der beim Biegeversuch gemessene Elastizitätsmodul von 11000 N/mm^2 ist nicht überdurchschnittlich. Eine Möglichkeit, die positiven Eigenschaften (Verfügbarkeit, Bearbeitbarkeit) des Bambus trotzdem auszunutzen, wäre es, ihn für eine Dachdeckung der Brücke zu verwenden. Bei der Planung sollte aber beachtet werden, dass ein leichtes Austauschen möglich ist.



Abbildung 14: Bambú Längs- und Querschnitt

(Bambus - Wikipedia, 2010), (Tönges, 2002)

4.1.4 Canelo

Gemeinhin wird Canelo als Louro bezeichnet. Auch die gemessene Steifigkeit (15600 N/mm²) und Darrdichte (0,63 g/cm³) passen bis auf geringe Abweichungen mit den Literaturwerten zusammen. Außerdem weist der Probekörper einen aromatischen Geruch auf, der zur Beschreibung des Holzes passt.

Laut den Indios ist das Holz leicht zu bearbeiten, gut verfügbar und schnell wachsend. Seine Dauerhaftigkeit schätzen sie aber als gering ein. Wenn das Holz frei bewittert ist oder Bodenkontakt besteht, hält es ihren Angaben nach nur ein bis zwei Jahre. Auch die Tropix Holzdatenbank beschreibt das Holz als anfällig für Pilze und holzbohrende Schädlinge. Es wird empfohlen, das Holz nur im Inneren zu verbauen.

Trotz des relativ hohen, im Biegeversuch gemessenen, Elastizitätsmoduls ist das Holz nur für nichttragende Bauteile, die nicht direkt beregnet werden zu empfehlen. Andernfalls ist in wenigen Jahren mit Schäden an der Brückenkonstruktion zu rechnen.

Tabelle 5: Literaturkennwerte Canelo

| | | | |
|----------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Rohdichte ρ_{12-15} : | 0,54 g/cm ³ | E-Modul: | ca. 12290 N/mm ² |
| Schwindmaß | | Biegefestigkeit σ_{bB} : | ca. 75 N/mm ² |
| radial ρ_r : | 3,5 % | Druckfestigkeit σ_{zB} : | ca. 50 N/mm ² |
| tangential ρ_t : | 7,1 % | | |



Abbildung 15: Canelo Längs- und Querschnitt

(Tropix, 2009)

4.1.5 Cedro macho

Im deutschen Sprachgebrauch wird Cedro macho als Andiroba bezeichnet. Obwohl die Bezeichnung Cedro macho laut Wagenführ (2007) und der Tropix Holzdatenbank in Ecuador normalerweise nicht üblich ist, kann aufgrund des Aussehens und der Darrdichte ($0,55\text{g/cm}^3$) einer Holzprobe davon ausgegangen werden, dass es sich hier tatsächlich um Andiroba handelt. Dass der vor Ort gemessene Wert des Elastizitätsmoduls von 8900 N/mm^2 unter dem weiter unten angegebenen Literaturwert liegt, lässt sich mit der hohen Feuchtigkeit des Holzes während des Biegeversuchs erklären.

Die Bearbeitbarkeit wird in der Literatur als normal bis gut eingestuft. Nagel-Schraubverbindungen sind möglich, ein Vorbohren wird jedoch empfohlen. Trocknet man das Holz, sollte dies langsam und vorsichtig geschehen, da es sonst dazu neigt zu reißen. Wird das Holz temporär feucht sind Holzschutzmaßnahmen zu treffen; ein dauerhaft feuchter Zustand sollte vermieden werden. Diese Angaben decken sich auch mit den Aussagen der Indios.

Cedro macho weist generell keine unterdurchschnittlich schlechten Festigkeitswerte auf. Aufgrund der schlechten Eigenschaften hinsichtlich seiner Haltbarkeit im feuchten Zustand ist das Holz aber für den Bau der Brücke nur bedingt geeignet.

Tabelle 6: Literaturkennwerte Cedro macho

| | | | |
|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Rohdichte ρ_{12-15} : | ca. $0,93\text{ g/cm}^3$ | E-Modul: | $9000-15000\text{ N/mm}^2$ |
| Schwindmaß | | Biegefestigkeit σ_{bB} : | $53-125\text{ N/mm}^2$ |
| radial ρ_r : | ca. $5,9\%$ | Druckfestigkeit σ_{zB} : | $37-64\text{ N/mm}^2$ |
| tangential ρ_t : | ca. $9,2\%$ | | |



Abbildung 16: Cedro macho Längs- und Querschnitt

(Tropix, 2009), (Wagenführ R. , 2007)

4.1.6 Chonta-Palme

Die Chonta-Palme wird in Deutschland als Pfirsichpalme bezeichnet. In der Literatur wird sie hauptsächlich in ihrer Eigenschaft als Nahrungsquelle erwähnt. Der Stamm der Palme besteht im Randbereich aus einem extrem harten Ring, der bei begutachteten Exemplaren eine Dicke von ca. 3 cm aufwies. Im Kernbereich ist das Holz extrem weich, es kann einfach herausgeschabt werden und ist sehr schädlingsanfällig.

Literaturwerte, die sich auf die Festigkeiten des Holzes beziehen, konnten nicht gefunden werden. Die gemessenen Werte sind allerdings vergleichsweise hoch. Die Darrdichte beträgt $1,47 \text{ g/cm}^3$, der Elastizitätsmodul 20700 N/mm^2 . Das Material ist nach Angaben der Indios gut zu bearbeiten und kommt häufig vor. Die Dauerhaftigkeit wird allerdings als eher schlecht eingeschätzt, was aufgrund der hohen Dichte verwundert.

Der größte Nachteil des Holzes besteht darin, dass nur sehr kleine Querschnitte herstellbar sind. Da nur der dünne äußere Teil des Stammes verwendet werden kann, sind die Bauteile entweder gebogen oder, falls der Querschnitt rechteckig sein soll, nur wenige cm dick. Ein weiteres Problem ist die überdurchschnittlich hohe Dichte, die das Holz im Hinblick auf das Eigengewicht der Brücke wenig brauchbar macht. Sollten für die Brücke allerdings Bauteile erforderlich sein, für die die möglichen Querschnitte ausreichen, kann dieses Material in Betracht gezogen werden.



Abbildung 17: Chonta-Palme Längs- und Querschnitt

(Pfirsichpalme - Wikipedia, 2010)

4.1.7 Guayabillo

Die Holzart Tanimbuca wird in Ecuador als Guayabillo bezeichnet. Die Darrdichte des Probekörpers liegt mit $0,78 \text{ g/cm}^3$ sehr nahe am Literaturwert. Die Größe des Elastizitätsmoduls differiert in den verfügbaren Quellen maßgeblich. Es werden 22380 (Tropix, 2009) und 15860 N/mm^2 (Woodworkers Source, 2010) angegeben. Der im Biegeversuch ermittelte Wert liegt bei 10200 N/mm^2 . Durch diese Streuung der Werte sind sie für eine statische Berechnung des Tragwerks nur bedingt möglich.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit wird dieses Holz nach Angaben der Indios sowie in der Literatur als schlecht bis mittelmäßig eingestuft. Die Bearbeitung des Holzes würde sich als schwer und zeitaufwändig erweisen.

Vor allem aufgrund der wenig einheitlichen Festigkeitswerte ist ein Einsatz in stark belasteten Bauteilen ungünstig. Auch hinsichtlich seiner Resistenzen gegen Schädlinge ist dieses Holz nur bedingt geeignet. Für wenig belastete und nicht direkt berechnete Bauteile wäre eine Verwendung unter Umständen möglich, allerdings nur, wenn sich das entsprechende Bauteil unkompliziert austauschen lässt.

Tabelle 7: Literaturkennwerte Guayabillo

| | | | |
|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Rohdichte ρ_{12-15} : | $0,54 \text{ g/cm}^3$ | E-Modul: | $15860-22380 \text{ N/mm}^2$ |
| Schwindmaß | | Biegefestigkeit σ_{bB} : | $122-151 \text{ N/mm}^2$ |
| radial ρ_r : | $3,5 \%$ | Druckfestigkeit σ_{zB} : | $66-77 \text{ N/mm}^2$ |
| tangential ρ_t : | $7,1 \%$ | | |



Abbildung 18: Guayabillo Längs- und Querschnitt

(Woodworkers Source, 2010), (Tropix, 2009)

4.1.8 Guayacan

Die Holzart Guayacan wird im Allgemeinen als Ipé bezeichnet. Hierbei handelt es sich um ein sehr schweres und hartes olivbraunes Holz, das laut Wagenführ (2007) für „stark beanspruchte Konstruktionen“ geeignet ist. laut der Tropix Holzdatenbank ist es für Brückenbauteile, bei denen Wasser- oder Bodenkontakt besteht, geeignet.

Es kann nach DIN 1052 (2008) in die Festigkeitsklasse D60 eingeordnet werden, sofern es eine Rohdichte von mindestens 1000 kg/m³ aufweist. Bei Nagel- und Schraubverbindung ist es notwendig das Holz vorzubohren. Es ist generell schwer zu bearbeiten. Laut der Tropix Holzdatenbank besitzt es gute Resistenzen gegen Holzschädlinge.

Insgesamt ist dieses Holz hinsichtlich seiner physikalischen Eigenschaften und seiner Resistenz gegen Schädlinge sicherlich eine der besten Alternativen. Die Tatsache, dass es nach deutscher Norm in eine Festigkeitsklasse eingeordnet werden kann macht das Holz zusätzlich attraktiv, da so alle Werte vorliegen, die für statische Berechnungen notwendig sind. Dem entgegenzustellen ist natürlich, dass es einerseits schwer zu bearbeiten ist und relativ selten vorkommt.

Tabelle 8: Literaturkennwerte Guayacan

| | | | |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Rohdichte ρ_{12-15} : | 0,96-1,1 g/cm ³ | E-Modul: | ca. 18800 N/mm ² |
| Schwindmaß | | Biegefestigkeit σ_{bB} : | 156-184 N/mm ² |
| radial ρ_r : | ca. 5,2 % | Druckfestigkeit σ_{zB} : | 77-95 N/mm ² |
| tangential ρ_t : | ca. 6,5 % | | |



Abbildung 19: Guayacan Längs- und Querschnitt

(DIN 1052, 2008), (Wagenführ R. , 2007)

4.1.9 Huambula

Fraglich ist bei diesem Holz, ob der Name Huambula tatsächlich der spanische Name ist. Wahrscheinlicher ist, dass es sich um eine nur lokal gängige Bezeichnung handelt. Nichtsdestoweniger ist davon auszugehen, dass das Holz botanisch richtig eingeordnet ist. Darauf deutet auch die am Probekörper gemessene Darrdichte von $0,74 \text{ g/cm}^3$ hin.

Die Indios werten das Holz als sehr dauerhaft. Unabhängig von den Umgebungsbedingungen wird eine Nutzungsdauer von über 20 Jahren geschätzt. Vor allem bei Bodenkontakt ist das Holz extrem haltbar. Dies deckt sich mit Literaturwerten. Demzufolge verwundert es auch nicht, dass das Material als schwer zu bearbeiten eingeschätzt wird.

Für Bauteile mit Bodenkontakt ist dieses Holz in jedem Fall zu empfehlen. Auch bei anderen Bauteilen, die nur schwer austauschbar sind und deswegen lange resistent gegen holzerstörende Schädlinge sein müssen, kann Huambula eingesetzt werden.

Tabelle 9: Literaturkennwerte Huambula

| | | | |
|----------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Rohdichte ρ_{12-15} : | 0,91 g/cm ³ | E-Modul: | ca. 15400 N/mm ² |
| Schwindmaß | | Biegefestigkeit σ_{bB} : | 135 N/mm ² |
| radial ρ_r : | ca. 5 % | Druckfestigkeit σ_{zB} : | 68 N/mm ² |
| tangential ρ_t : | ca. 8 % | | |



Abbildung 20: Huambula Längs- und Querschnitt

(Where Has All the Holy Wood Gone?, 2009), (Woodworkers Source, 2010)

4.1.10 Laurel

Obwohl etliche Hölzer in der Literatur als Laurel bezeichnet werden findet sich keines, dem das hier untersuchte Holz entsprechen kann. Weder der gemessene Elastizitätsmodul von 4500 N/mm² noch die Darrdichte von 0,35 g/cm³ korrelieren annähernd mit Werten aus der Literatur. Auch hinsichtlich des Holzbildes finden sich keine Übereinstimmungen.

Da die Indios das Holz außerdem als eher wenig dauerhaft einschätzen und sowohl Dichte als auch Steifigkeit auf schlechte Materialeigenschaften hindeuten, stellt dieses Holz keine Alternative für den Bau der Brücke dar.



Abbildung 21: Laurel Längs- und Querschnitt

(Wagenführ R. , 2007)

4.1.11 Pechiche

Auch die von den Indios als Pechiche bezeichnete Holzart konnte nicht genau bestimmt werden. Es gibt zwar eine Holzart, die auch als Pechiche bezeichnet wird, allerdings sind die Festigkeits- und Steifigkeitswerte (Darrdichte $0,61 \text{ g/cm}^3$, Elastizitätsmodul 9000 N/mm^2) des vorgefundenen Holzes zu gering, als dass hier von einer sicheren Übereinstimmung ausgegangen werden kann.

Da weder die natürliche Dauerhaftigkeit noch die mechanischen Eigenschaften überdurchschnittlich gut sind und es außerdem als selten eingeschätzt wird, sollte es nicht vorrangig für den Brückenbau eingesetzt werden.



Abbildung 22: Pechiche Längs- und Querschnitt

(Woodworkers Source, 2010)

4.1.12 Tucuta

Eine gängigere Bezeichnung für Tucuta lautet American muskwood. Die gemessene Darrdichte von $0,65 \text{ g/cm}^3$ und der im Biegeversuch ermittelte Elastizitätsmodul 11500 N/mm^2 stimmen weitgehend mit Werten aus der Literatur überein.

Die Indios ordnen das Holz als mittelmäßig dauerhaft und bearbeitbar ein. Allerdings ist es laut ihren Angaben häufig zu finden. In der Literatur wird allerdings von einer natürlichen Resistenz gegen Holzschädlinge (Pilze, Insekten) berichtet. Die Bearbeitbarkeit wird weder als besonders gut oder schlecht bewertet.

Generell kann dieses Holz für Sekundärbauteile eingesetzt werden, da es oft vorkommt und nicht überdurchschnittlich schwer zu bearbeiten ist. Aufgrund der niedrigen Steifigkeit und Festigkeit ist für stark beanspruchte Bauteile ein festeres Holz vorzuziehen. Obwohl sich die Angaben zur Dauerhaftigkeit hinsichtlich der Meinung der Indios und den Angaben aus der Literatur nicht vollkommen decken, kann es insgesamt als überdurchschnittlich dauerhaft eingeschätzt werden.

Tabelle 10: Literaturkennwerte Tucuta

| | | | |
|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Rohdichte ρ_{12-15} : | $0,56 \text{ g/cm}^3$ | E-Modul: | ca. 10330 N/mm^2 |
| Schwindmaß | | Biegefestigkeit σ_{bB} : | 83 N/mm^2 |
| radial ρ_r : | ca. 3 % | Druckfestigkeit σ_{zB} : | 46 N/mm^2 |
| tangential ρ_t : | ca. 7 % | | |



Abbildung 23: Tucuta Längs- und Querschnitt

(Peruforestal), (Woodworkers Source, 2010)

4.2 Allgemeiner Vergleich der Hölzer

Der folgende Abschnitt gibt einen Gesamtüberblick und Vergleich aller verfügbaren Hölzer hinsichtlich ihrer Eigenschaften, die für den Brückenbau von Interesse sind.

An den hier beschriebenen Hölzern zeigt sich, wie stark die Kenngrößen von unterschiedlichen Tropenhölzern variieren können. Allerdings wird gleichzeitig klar, dass Werte wie die Dichte, die Steifigkeit und die Festigkeit eines Holzes bis zu einem gewissen Grad korrelieren.

Generell können Balsamo, Guayacan und Huambula als die Hölzer mit den besten Eigenschaften angesehen werden. Sie besitzen alle überdurchschnittliche Steifigkeits- und Festigkeitswerte, die mit sehr guten Merkmalen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit einhergehen. Obwohl Guayabillo ähnlich mechanisch beanspruchbar ist, muss es aufgrund seiner geringen Dauerhaftigkeit als insgesamt schlechter eingestuft werden.

In der folgenden Tabelle 11 werden die Hölzer hinsichtlich aller ihrer Eigenschaften, die für die Konstruktion der Brücke relevant sind, eingestuft.

Tabelle 11: Vergleich der Hölzer hinsichtlich ihrer Eignung für den Bau der Brücke

| gut geeignet | mittelmäßig bzw. unter bestimmten Umständen geeignet | schlecht geeignet |
|---------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Balsamo Guayacan Huambula | Bambú Cedro macho Guayabillo Pechiche | Abiu Canelo Chonta-Palme Laurel Tucuta |

Dass Hölzer in Tabelle 11 als „schlecht geeignet“ eingestuft sind, liegt vor allem an ihrer schlechten Haltbarkeit. Meist kommen auch niedrige Steifigkeitswertige negativ hinzu. Eine Ausnahme bildet hier die Chonta-Palme, die vermutlich aufgrund der ungenügenden Querschnittsgrößen nicht benutzt werden kann. Insgesamt wäre es wenig nachhaltig diese Hölzer zu verbauen. Auf lange Sicht hin ist es ressourcenschonender, Hölzer zu verwenden, die eine lange Haltbarkeit garantieren, so dass häufige Nachbesserungen an der Konstruktion und damit verbundene Fällungen vermieden werden können. Dazu muss bemerkt werden, dass keines der „gut geeigneten“ Hölzer durch das Washingtoner Artenschutzübereinkommen als gefährdet gekennzeichnet ist. (Richter & Dallwitz, 2009)

4.3 Materialvorschläge für einzelne Bauteile

Um Empfehlungen für die Materialwahl einzelner Bauteile auszusprechen, muss zunächst überlegt werden, welche Arten von Bauteilen für die Brückenkonstruktion überhaupt notwendig sind. Dazu wird im Folgenden kurz aufgelistet, in welche Art von Einzelteilen sich eine mögliche Konstruktion der Brücke überhaupt aufgliedern kann. Diese Bauteile werden zuerst hinsichtlich ihrer generellen Funktion und der für sie nötigen Holzeigenschaften beschrieben. Anschließend werden jeweils Empfehlungen für eine Materialwahl ausgesprochen.

4.3.1 Bauteile mit Bodenkontakt



Abbildung 24: Bauteil mit Bodenkontakt

Bauteile, die entweder im Boden vergraben sind oder aufgrund ihrer Position im Tragewerk mit dem Boden in Kontakt kommen, werden auf jeden Fall notwendig sein. So kann möglicherweise weitgehend auf eine aufwändige (Stahl)Betongründung verzichtet werden, die ansonsten einen hohen Kosten- und Arbeitsaufwand darstellen würde.

Für diese Bauteile ist vorzugsweise Huambula zu verwenden, da es im Boden überdurchschnittlich lange haltbar ist. Auch die Festigkeitswerte sind ausreichend hoch. Ist es nötig, die Brücke auf Holzpfählen zu gründen, sollte auch dieses Material verwendet werden.

Als Alternative wäre Guayacan vorstellbar, da es aufgrund seiner generell hohen Härte und Dichte ähnlich wenig anfällig für Schädlinge ist. Seine hohen Festigkeitswerte machen es zusätzlich attraktiv.

4.3.2 Ständig berechnete Bauteile

Wird die Brücke ohne Dach konstruiert, ist davon auszugehen, dass alle Bauteile hohen Niederschlagsmengen ausgesetzt und demnach generell feuchter als überdachte Hölzer sind. Die Folge ist ein generell höheres Risiko hinsichtlich Pilzbefall und daraus resultierender Holzfäule.

Für tragende Elemente sind hier Guayacan und Balsamo am besten geeignet. Bei den am stärksten belasteten Bauteilen wäre Guayacan aufgrund seiner höheren Festigkeit vorzuziehen. Ansonsten sollte Balsamo eingesetzt werden dessen Festigkeit nur geringfügig niedriger ist. Da es häufiger vorkommt als Guayacan, kann so der Einsatz des selteneren Holzes vermieden werden. Beide Hölzer sind auch im feuchten Zustand schädlingsresistent.

Für wenig belastete Bauteile sollte generell Balsamo verwendet werden, sofern diese der Witterung frei ausgesetzt sind. Es stellt aufgrund seiner guten Verfügbarkeit und seiner Festigkeitswerte insgesamt die beste Alternative dar.

4.3.3 Überdachte Bauteile



Sollte die Brücke mit einem Dach versehen werden, das darunterliegende Bauteile vor Regen schützt, können in diesem Bereich weitere Hölzer eingesetzt werden.

So könnten zusätzlich Guayabillo, Cedro macho und Pechiche eingesetzt werden. Sie sind mittelmäßig bis gut verfügbar und mittelmäßig fest. Für nur gering belastete Bauteile stellen sie deshalb eine Alternative dar. Bei Bauteilen, die großen Lasten standhalten müssen, sollte aber trotzdem Guayacan oder Balsamo bevorzugt verwendet werden.

Abbildung 25:
Überdachte Bauteile

Generell stellt sich allerdings die Frage, ob es sinnvoll ist, ein gut verfügbares und sehr haltbares sowie festes Holz wie Balsamo, durch Hölzer minderwertigerer Qualität zu ersetzen. Einem nachhaltigen und auf lange Sicht standsicheren Bau würde die Verwendung von Guayabillo und Cedro macho sicherlich nicht zugutekommen.

4.4 Vergleich der Holzeigenschaften mit deutschen Festigkeitsklassen

Die vorgefundenen Tropenhölzer mit deutschen Festigkeitsklassen zu vergleichen ist generell schwierig, es wird hier aber dennoch der Versuch einer ungefähren Einordnung unternommen. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den folgenden Aussagen nicht um absolute Ergebnisse handelt. Wird ein unbekanntes Holz in eine Festigkeitsklasse eingeordnet, sind normalerweise neben der Bestimmung von Rohdichte und Elastizitätsmodul Zerstörungsprüfungen, mit denen unter anderem die Biegefestigkeit bestimmt werden kann, unumgänglich.

Im Rahmen der Untersuchungen vor Ort sollten keine Zerstörungsprüfungen vorgenommen werden, um die untersuchten Hölzer weiter verwenden zu können. Außerdem könnten aussagekräftige Prüfungen der Biegefestigkeit aufgrund ungenügender Ausrüstung nicht vorgenommen werden.

Von Ravenshorst, van der Linden u.a. (2004) wurde zwar ein Verfahren entwickelt um unbekannte (Tropen)Hölzer in Festigkeitsklassen einzuordnen, allerdings muss auch hier eine Zerstörungsprüfung stattfinden, obwohl im Vergleich zu anderen Prüfmethode nur ein Viertel der

Probekörper zerstört werden muss. Trotzdem ist es Ziel dieser Arbeit, wenigstens die als Bauholz gut geeigneten Holzarten auch ohne Zerstörungsprüfungen einer Festigkeitsklasse nach deutscher Norm zuzuordnen. Aufgrund der zuvor genannten Mittelwerte aus Literaturrecherchen kann auf jeden Fall eine grundlegende Aussage erfolgen, die aber wie bereits erwähnt nur eine Einschätzung darstellt.

Günstig ist hierbei, dass der Holzart Guayacan schon die deutsche Festigkeitsklasse D60 zugeordnet ist, sofern dieses Holz eine Rohdichte von mehr als 1 g/cm³ aufweist. Da Rohdichte, Festigkeit und Elastizitätsmodul korrelieren, kann man davon ausgehen, dass ein Probekörper aus Guayacan, der eine geringere Rohdichte aufweist, dementsprechend in eine niedrigere Festigkeitsklasse (zum Beispiel D50) eingeordnet werden kann.

Neben Guayacan wurden in erster Linie Balsamo und Huambula als gut für den Bau der Brücke geeignet eingestuft. Insofern ist vor allem für diese Hölzer eine Einstufung hinsichtlich der Festigkeitsklasse und der damit einhergehenden Steifigkeits- und Festigkeitswerte sinnvoll. Bei der Einschätzung werden die Literaturkennwerte von Guayacan mit denen des jeweiligen Holzes verglichen, denn so kann festgestellt werden, wie das jeweilige Holz im Vergleich zu Guayacan einzuordnen ist.

Dazu werden zuerst die Literaturkennwerte von Guayacan mit den Rechenwerten eines D60 verglichen, um festzustellen, wie die Mittelwerte aus der Literatur mit den teilweise charakteristischen Werten der Festigkeitsklasse korrelieren (Tabelle 12).

Tabelle 12: Vergleich der Mittelwerte von Guayacan mit den Rechenwerten eines Laubholzes der Festigkeitsklasse D60 (Bei Intervallen ist in Klammern der Durchschnittswert angegeben)

| | Rohdichte ρ_{12-15} | E-Modul | Biegefestigkeit σ_{bB} : | Druckfestigkeit σ_{zB} : |
|----------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Guayacan | 0,96-1,1 (103) g/cm ³ | 18800 N/mm ² | 156-184 (170) N/mm ² | 77-95 (86) N/mm ² |
| D60 | 0,7 g/cm ³ | 17000 N/mm ² | 60 N/mm ² | 32 N/mm ² |

Hier lässt sich sofort erkennen, dass es sich bei den Angaben zur Biege- und Druckfestigkeit des D60 um charakteristische Werte handelt, die natürlich niedriger ausfallen als die in der Literatur angegebenen Mittelwerte. Auch die Rohdichte ist bei einem normalen Holz der Festigkeitsklasse D60 geringer als die, die Guayacan tatsächlich aufweisen muss, um dieser Festigkeitsklasse zugeordnet werden zu können. Insofern sollte bei einer statischen Berechnung ein höheres Eigengewicht der Bauteile angenommen werden, das näher an dem tatsächlichen Wert von Guayacan liegt.

Weiterhin ist zu beachten, dass der vor Ort gemessene Steifigkeitswert von Guayacan (14700 N/mm²) deutlich unter den in der Tabelle angegebenen Werten liegt. Demnach wäre der Probekörper in die Festigkeitsklasse D50 einzuordnen. Hier zeigt sich wieder, dass Tropenhölzer auch innerhalb einer Art in ihren Kennwerten variieren können. Deshalb sollten Bauteile, deren

Querschnitt stark beansprucht wird nach Möglichkeit vor dem Einbau auf ihre Steifigkeit getestet werden. So könnte relativ einfach festgestellt werden, ob ein bestimmtes Holz tatsächlich der angenommenen Festigkeitsklasse entspricht und nicht eventuell zu schwach ist um die vorgesehenen Lasten aufzunehmen. Diese Aussage gilt selbstverständlich für alle hier betrachteten Hölzer und nicht nur für Guayacan im Speziellen.

Aufgrund dieser Aussagen zur Holzart Guayacan soll nun auch für Balsamo und Huambula die Einordnung in eine Festigkeitsklasse erfolgen.

Tabelle 13: Vergleich der Kennwerte von Balsamo und Guayacan (Bei Intervallen ist in Klammern der Durchschnittswert angegeben)

| | Rohdichte ρ_{12-15} | E-Modul | Biegefestigkeit σ_{bB} : | Druckfestigkeit σ_{zB} : |
|----------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Guayacan | 0,96-1,1 (103) g/cm ³ | 18800 N/mm ² | 156-184 (170) N/mm ² | 77-95 (86) N/mm ² |
| Balsamo | 0,93 g/cm ³ | 16800 N/mm ² | 150 N/mm ² | 82 N/mm ² |

Tabelle 14: Vergleich der Kennwerte von Huambula und Guayacan (Bei Intervallen ist in Klammern der Durchschnittswert angegeben)

| | Rohdichte ρ_{12-15} | E-Modul | Biegefestigkeit σ_{bB} : | Druckfestigkeit σ_{zB} : |
|----------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Guayacan | 0,96-1,1 (103) g/cm ³ | 18800 N/mm ² | 156-184 (170) N/mm ² | 77-95 (86) N/mm ² |
| Huambula | 0,91 g/cm ³ | 15400 N/mm ² | 135 N/mm ² | 68 N/mm ² |

Hier (Tabelle 13 und Tabelle 14) lässt sich sofort erkennen, dass die Werte insgesamt relativ nahe aneinander liegen, wenngleich sowohl Balsamo als auch Huambula durchgehend niedrigere Festigkeits- und Steifigkeitswerte aufweisen. Aufgrund dieses Vergleichs können diese beiden Hölzer allgemein der Festigkeitsklasse D50 zugeordnet werden. Allerdings sollte auch hier beachtet werden, dass die Hölzer aufgrund der hohen Rohdichte ein höheres Eigengewicht aufweisen, als ihre Festigkeitsklasse angibt. Weiterhin sollten Bauteile aus diesem Material genau wie Guayacan vor dem Einbau auf ihre tatsächliche Steifigkeit hin überprüft werden. Sollte sich dann ein wesentlich geringerer Steifigkeitswert ergeben, sollte man diese Hölzer nur für Bauteile einsetzen, bei denen eine Einstufung nach Festigkeitsklasse D40 ausreichend ist.

Aufgrund dieser Folgerungen ist auf jeden Fall eine erste statische Berechnung des Brückentragwerks möglich, bei dem die lokal vorhandenen Hölzer als tragende Bauteile eingesetzt werden können. Trotzdem muss nochmals erwähnt werden, dass es sich nur um eine Einschätzung und nicht um ein absolutes Ergebnis handelt. Um sicherzustellen, dass die hier gefundenen Zusammenhänge auch tatsächlich den realen Zuständen entsprechen, sollte auf jeden Fall versucht werden, an ausgewählten Hölzern wenigstens einige wenige Zerstörungsprüfungen durchzuführen.



5 Fazit

Der Überbegriff Tropenholz bezeichnet eine äußerst umfangreiche Materie, die im Vergleich zu europäischen Hölzern bisher in der Fachliteratur weniger ausführlich erforscht und beschrieben ist. Zugleich stellt der Werkstoff Holz an sich ein sehr weitgefächertes Thema dar, welches in viele verschiedene Bereiche aufgeteilt werden kann. Diese Arbeit beschäftigt sich mit vielen der Bereiche und Aspekten dieses Materials, aus dem die Brücke im ecuadorianischen Regenwald hergestellt werden soll.

Um die lokal verfügbaren Hölzer hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für ein Bauwerk, das nach deutschen Maßstäben bemessen und konstruiert werden soll, einzuschätzen, waren umfangreiche Untersuchungen notwendig.

Einerseits musste vor Ort ermittelt werden welche Hölzer überhaupt vorhanden sind, wie diese bezeichnet werden und mit welcher Häufigkeit sie vorkommen. Vor Ort sollten außerdem sowohl Einschätzungen zu Festigkeit bzw. Steifigkeit als auch zu Dauerhaftigkeit und Bearbeitbarkeit der Hölzer vorgenommen werden. Dazu war es nötig Versuche durchzuführen und die Kenntnisse der lokalen Bevölkerung zu dokumentieren.

Andererseits mussten im Nachhinein die vor Ort ermittelten Ergebnisse überprüft werden, indem sie mit Daten aus der Fachliteratur verglichen wurden. Hier war es als erstes notwendig, die Holzarten, von denen anfangs nur lokale Bezeichnungen bekannt waren, zu bestimmen und ihnen allgemein bekannte Bezeichnungen zuzuordnen. Weiterhin sollten die Hölzer katalogisiert, aufgrund ihrer Tauglichkeit als Baumaterial für die Brückenkonstruktion eingestuft und in deutsche Festigkeitsklassen eingeordnet werden.

Die Untersuchungen, Arbeitsschritte und Ergebnisse, die dieses Vorgehen mit sich bringt sind in der vorliegenden Bachelorarbeit dargestellt.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mit den hier erarbeiteten Ergebnissen wesentliche Voruntersuchungen für die Diplomarbeit, die sich mit der tatsächlichen Planung und Durchführung des Brückenbaus beschäftigt, geleistet wurden. Es steht fest, welche Hölzer als Baumaterial zur Verfügung stehen, wie diese am besten eingesetzt werden können und mit welchen Kennwerten eine statische Berechnung vorgenommen werden soll. Außerdem können die nun bekannten Daten auch für die Planung der Akademie, die im Indiodorf Sharamentsa entstehen soll genutzt werden und tragen so insgesamt zur Unterstützung und Zukunftssicherung der indigenen Bevölkerung in Ecuador bei.

6 Literaturverzeichnis

Diercke Weltatlas. (2002). Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag.

DIN 1052. (2008). *DIN 1052:2008-12*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Tropix. (2009). Abgerufen am 21. 7. 2010 von <http://tropix.cirad.fr>

Where Has All the Holy Wood Gone? (2009). Abgerufen am 21. 7. 2010 von Environment News Service: <http://www.ens-newswire.com/ens/sep1999/1999-09-16-03.asp>

Balsambäume - Wikipedia. (2010). Abgerufen am 21. 7. 2010 von <http://de.wikipedia.org/wiki/Balsamb%C3%A4ume>

Bambus - Wikipedia. (2010). Abgerufen am 21. 7. 2010 von Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bambus>

Pfirsichpalme - Wikipedia. (2010). Abgerufen am 21. 7. 2010 von Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Pfirsichpalme>

Pouteria caimito - Wikipedia. (2010). Abgerufen am 21. 7. 2010 von Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Pouteria_caimito

Tropischer Regenwald - Wikipedia. (2010). Abgerufen am 17. 7. 2010 von Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Tropischer_Regenwald

Wikipedia - Holz. (2010). Abgerufen am 27. 7. 2010 von Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Holz>

Woodworkers Source. (2010). Abgerufen am 21. 7. 2010 von <http://www.woodworkerssource.com>

Harzmann, L. J. (1988). *Kurzer Grundriß der allgemeinen Tropenholzkunde*. Leipzig: S. Hirzel Verlag.

Kollmann, F. (1982). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer Verlag.

Mombächer, R. (1962). *Kleine allgemeine Tropenholzkunde*. Stuttgart: Holz-Zentralblatt-Verlags-GmbH.

Peruforestal. (kein Datum). Abgerufen am 01. 08. 2010 von Peruforestal: <http://www.peruforestal.org/especies.html>



Ravenshorst, G., van der Linden, M., Vrouwenvelder, T., & van de Kuilen, J. W. (2004). An economic method to determine the strength class of wood species. *Heron Volume 49, Issue 4, Special Issue: Wood*.

Richter, H., & Dallwitz, M. (25. 6 2009). *Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval*. Abgerufen am 1. 8 2010 von <http://delta-intkey.com>

Tönges, C. (2002). *Entwerfen mit Bambus*. Abgerufen am 20. 7. 2010 von <http://bambus.rwth-aachen.de/de/index.html>

Wagenführ, A. (2008). *Taschenbuch der Holztechnik*. München: Carl Hanser Verlag.

Wagenführ, R. (2007). *Holzatlas*. Leipzig: Carl Hanser Verlag.

Wikipedia - Stratifikation. (kein Datum). Abgerufen am 24. 7. 2010 von Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Stratifikation_%28%C3%96kologie%29

7 **Abbildungsverzeichnis**

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Zukünftiger Standort der Brücke..... | 6 |
| Abbildung 2: Brückenentwürfe aus der Diplomarbeit von Stefan Loebus..... | 6 |
| Abbildung 3: Vertikale Gliederung der Vegetation im tropischen Regenwald (Quelle: Wikipedia) ... | 8 |
| Abbildung 4: Urwaldriese..... | 9 |
| Abbildung 5: Übergang zwischen Kern- und Splintholz..... | 9 |
| Abbildung 6: Termiten | 10 |
| Abbildung 7: Struktur eines Laubholzes (links) und eines Nadelholzes (rechts) im Rasterelektronenmikroskop (Quelle: Wikipedia)..... | 11 |
| Abbildung 8: Durchführung des Biegeversuchs | 14 |
| Abbildung 9: Ergebnisse des Biegeversuchs vor Ort | 15 |
| Abbildung 10: Holzfeuchte der Proben..... | 16 |
| Abbildung 11: Dauerhaftigkeit der Hölzer nach Einschätzung der Indios | 19 |
| Abbildung 12: Abiu Längs- und Querschnitt | 22 |
| Abbildung 13: Balsamo Längs- und Querschnitt..... | 23 |
| Abbildung 14: Bambú Längs- und Querschnitt | 24 |
| Abbildung 15: Canelo Längs- und Querschnitt | 25 |
| Abbildung 16: Cedro macho Längs- und Querschnitt..... | 26 |
| Abbildung 17: Chonta-Palme Längs- und Querschnitt | 27 |
| Abbildung 18: Guayabillo Längs- und Querschnitt..... | 28 |
| Abbildung 19: Guayacan Längs- und Querschnitt | 29 |
| Abbildung 20: Huambula Längs- und Querschnitt | 30 |
| Abbildung 21: Laurel Längs- und Querschnitt..... | 31 |
| Abbildung 22: Pechiche Längs- und Querschnitt..... | 32 |



| | |
|--------------------------------------------------|----|
| Abbildung 23: Tucuta Längs- und Querschnitt..... | 33 |
| Abbildung 24: Bauteil mit Bodenkontakt..... | 35 |
| Abbildung 25: Überdachte Bauteile..... | 36 |

8 Tabellenverzeichnis

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Auflistung der vorgefundenen Hölzer | 13 |
| Tabelle 2: Verfügbarkeit der vorgefundenen Hölzer | 13 |
| Tabelle 3: Bearbeitbarkeit der Hölzer | 19 |
| Tabelle 4: Literaturkennwerte Bálsamo | 23 |
| Tabelle 5: Literaturkennwerte Canelo | 25 |
| Tabelle 6: Literaturkennwerte Cedro macho | 26 |
| Tabelle 7: Literaturkennwerte Guayabillo | 28 |
| Tabelle 8: Literaturkennwerte Guayacan | 29 |
| Tabelle 9: Literaturkennwerte Huambula | 30 |
| Tabelle 10: Literaturkennwerte Tucuta | 33 |
| Tabelle 11: Vergleich der Hölzer hinsichtlich ihrer Eignung für den Bau der Brücke | 34 |
| Tabelle 12: Vergleich der Mittelwerte von Guayacan mit den Rechenwerten eines Laubholzes der Festigkeitsklasse D60 (Bei Intervallen ist in Klammern der Durchschnittswert angegeben) ... | 37 |
| Tabelle 13: Vergleich der Kennwerte von Balsamo und Guayacan (Bei Intervallen ist in Klammern der Durchschnittswert angegeben) | 38 |
| Tabelle 14: Vergleich der Kennwerte von Huambula und Guayacan (Bei Intervallen ist in Klammern der Durchschnittswert angegeben) | 38 |

9 Anhang

Querschnittswerte der Probekörper des Biegeversuchs

| Holzart | Querschnitt des Probekörpers [mm] | | | errechneter E-Modul bei jeweiliger Last [N/mm ²] | | | E(Mittelwert) [N/mm ²] |
|------------|-----------------------------------|------|-------|--------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------------------------------|
| | Breite | Höhe | Länge | E (F=620) | E (F=840) | E (F=1570) | |
| Guayacan | 63 | 58,5 | 1992 | 19428 | 14623 | 16399 | 14690 |
| | 58,5 | 63 | 1992 | 13960 | 14185 | 15711 | |
| | 59 | 68,5 | 1992 | 12921 | 12504 | 14226 | |
| | 68,5 | 59 | 1992 | 14514 | 13110 | 14702 | |
| Balsamo | 41 | 60 | 2375 | 19539 | 15883 | 16047 | 19449 |
| | 60 | 41 | 2375 | 17315 | 17903 | 17660 | |
| | 39 | 62 | 2375 | 20309 | 18917 | 20952 | |
| | 62 | 39 | 2375 | 21715 | 22498 | 24650 | |
| Huambula | 58,5 | 54 | 2303 | 12846 | 13260 | 13696 | 12226 |
| | 54 | 58,5 | 2303 | 10945 | 11298 | 11986 | |
| | 59 | 58 | 2303 | 10964 | 12379 | 13015 | |
| | 58 | 59 | 2303 | 12226 | 11963 | 12129 | |
| Pechiche | 52 | 57 | 2263 | 8110 | 8715 | 9084 | 8980 |
| | 57 | 52 | 2263 | 8620 | 9202 | 9620 | |
| | 57 | 53 | 2263 | 9204 | 9889 | 10114 | |
| | 53 | 57 | 2263 | 7957 | 8265 | | |
| Tucuta | 71 | 43 | 2010 | 10877 | 12330 | 12143 | 11499 |
| | 43 | 71 | 2010 | 9622 | 10553 | 11834 | |
| | 82,5 | 50 | 2010 | 12206 | 12720 | 12878 | |
| | 50 | 82,5 | 2010 | 11208 | 10123 | | |
| Guayabillo | 51,5 | 73 | 2399 | 8217 | 9648 | 10018 | 10188 |
| | 73 | 51,5 | 2399 | 9331 | 9380 | 9705 | |
| | 50 | 79 | 2399 | 10851 | 9801 | 10991 | |
| | 79 | 50 | 2399 | 12384 | 11744 | | |



| | | | | | | | |
|--------------------------------------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Chonta-Palme (Trapezquerschnitt) | Breiten | | | | | | |
| | 69/44 | 40 | 2012 | 17457 | 18193 | 20093 | 20723 |
| | 44/69 | 40 | 2012 | 17457 | 18921 | 21050 | |
| | 62/45 | 35 | 2012 | 21168 | 22596 | 24029 | |
| 45/62 | 35 | 2012 | 22932 | 24054 | | | |

| | | | | | | | |
|---------------|----|----|------|-------|-------|-------|--------------|
| Canelo | 51 | 56 | 2750 | 15648 | 15730 | 16275 | 15610 |
| | 56 | 51 | 2750 | 17358 | 18373 | 19979 | |
| | 51 | 55 | 2750 | 12255 | 13198 | 13743 | |
| | 55 | 51 | 2750 | 13807 | 15349 | | |

| | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|--|-------------|
| Laurel | 48 | 53,5 | 2352 | 4157 | 4373 | | 4546 |
| | 53,5 | 48 | 2352 | 4869 | 5075 | | |
| | 54 | 53 | 2352 | 4645 | 4855 | | |
| | 53 | 54 | 2352 | 4027 | 4365 | | |

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|------------|------|-------|-------|-------|--------------|
| Bambus (Rohrquerschnitt) | Radius | Wandstärke | | | | | |
| | 39 | 9 | 2643 | 9891 | 11257 | 10520 | 11064 |
| | | | | | | | |
| | 45 | 10 | 2643 | 12065 | 10897 | 11751 | |
| | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|--------------------|----|----|------|------|------|------|-------------|
| Cedro macho | 67 | 54 | 2397 | 8797 | 9138 | 9150 | 8851 |
| | 54 | 67 | 2397 | 8215 | 8904 | 9509 | |
| | 68 | 57 | 2397 | 8072 | 8506 | 8943 | |
| | 57 | 68 | 2397 | 9162 | 8965 | | |

| | | | | | | | |
|-------------|----|----|------|-------|-------|-------|--------------|
| Abiu | 57 | 48 | 2820 | 13129 | 14942 | 14395 | 14982 |
| | 48 | 57 | 2820 | 14483 | 15582 | 15971 | |
| | 52 | 48 | 2820 | 13140 | 15451 | 15944 | |
| | 48 | 52 | 2820 | 15148 | 16614 | | |



Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

.....

Simon Vilgertshofer

München, 2. August 2010