

Constructies in gelamineerd bamboe

Toepassing van gelamineerd bamboe in constructies in West Europa

Midas van Veldhuizen
Sint Oedenrode, januari 2016

Colofon

In opdracht van

Hogeschool Utrecht
Faculteit Natuur en Techniek
Instituut voor de Gebouwde Omgeving
Nijenoord 1
3500 AD Utrecht
Eerste begeleider: Jefta Wiersema MSEng
Tweede begeleider: Ir. Karel Fouraschen

Afstudeerbedrijf

Naam bedrijf: Korlam
Adres: Sluitappel 61
5491 TS Sint-Oedenrode
Telefoon: 0413 – 767200
Naam begeleider: Ing. Hans van der Grinten
Functie: Algemeen directeur
E-mail: hans@korlam.nl

Student

Opgesteld door: Midas van Veldhuizen
Email: midas.vanveldhuizen@student.hu.nl
Studentnummer: 1569051
Afstudeerrichting: Bouwconstructies
Cursuscode: TBWK-AFB8-03

Datum: 4 januari 2016

VOORWOORD

Dit rapport is geschreven voor het afronden van mijn Bachelor bouwkunde aan de Hogeschool Utrecht, met afstudeerdifferentiatie bouwconstructies. Tijdens mijn stage bij Arcos houtconstructies in Sint Oedenrode (nu Korlam) ben ik in contact gekomen met hout als constructiemateriaal. Als je er eenmaal mee bekend bent zie je het overal terugkomen. Voor mijn afstuderen zou ik graag iets houtconstructies doen. En ook het duurzaamheidsaspect spreekt mij heel erg aan en daarom ben ik gaan kijken naar de mogelijkheden binnen de houtindustrie. Toen ben ik, min of meer per toeval, uitgekomen bij bamboe. Wat voor hout geldt, is zeker ook waar voor bamboe. Als je er eenmaal mee in contact bent gekomen zie je het overal. En gelukkig verveelt het tot nu toe nog niet.

Graag wil ik Hans van der Grinten ontzettend bedanken voor de kansen die ik heb gekregen. Ten eerste heb ik heel erg veel geleerd en ook voor het vertrouwen, de plek en de middelen om aan mijn onderzoek te werken. Ook Jeroen van den Berkmortel, voormalig constructeur bij Arcos en Korlam, wil ik bedanken voor het delen van zijn kennis en ervaring.

Mijn dank gaat ook uit naar Serena Wang en Frans Loderus van Ecobam, voor het beschikbaar stellen van testmateriaal voor mijn onderzoek. Marina van der Zee van het SHR (Stichting Hout Research) voor het delen van kennis met betrekking tot het testen van materialen.

Als laatst wil ik mijn dank uiten aan mijn begeleiders vanuit de Hogeschool Utrecht. Jefta Wiersema, niet alleen voor de begeleiding tijdens mijn afstuderen, maar ook voor alle andere projecten die er in korte tijd aan vooraf gingen. En Karel Fouraschen, tevens mijn SLB-er, voor zowel de begeleiding tijdens mijn afstuderen, als de begeleiding en het vertrouwen als SLB-er.

Midas van Veldhuizen

Sint Oedenrode, 4 januari 2016

SAMENVATTING

Houtconstructies en duurzaamheid gaat goed samen. Maar wellicht zijn er materialen die hout qua duurzaamheid kunnen overtreffen. Om dat aan te tonen is in dit onderzoek gekeken naar de mogelijkheid van het construeren in gelamineerd bamboe, als concurrerend materiaal van gelamineerd hout. Het onderzoek begint bij de basis: Wat is bamboe? Om de eigenschappen van dit product in beeld te brengen is er in hoofdstuk 2 uitgebreid uitgelegd wat het is, waar het vandaag komt en hoe we het kunnen gebruiken als grondstof voor gelamineerde producten.

In hoofdstuk 3 is een onderzoek gedaan naar de mechanische eigenschappen van gelamineerd bamboe. Ondanks dat er veel publicaties zijn met de meest uiteen lopende waarden, zijn er voor Europa en Nederland geen karakteristieke rekenwaarden bekend, of vastgelegd in een norm. Om de waarden die wel gepubliceerd zijn te kunnen onderbouwen is er een sterktest test gedaan van gelamineerd Moso bamboe. De uitkomsten van deze sterktest tests worden vergeleken met de waarden die gepubliceerd zijn en naar waarden die voorgekomen zijn uit andere onderzoeken.

Hoofdstuk 4 richt zich op de kosten van gelamineerd bamboe. Hierbij worden de kosten zo breed mogelijk aangepakt. Zowel de financiële kosten, als de ecologische kosten zijn onderzocht. De financiële kosten zijn interessant om te weten of het voor constructies een concurrerend materiaal kan zijn van gelamineerd hout. De ecologische kosten zijn onderzocht om inzichtelijk te maken wat de positieve eigenschappen van bamboe zijn. En ook wat de negatieve zijde is van het toepassen van een product dat van de andere kant van de Wereld gehaald moet worden.

Er is een casus uitgewerkt in hoofdstuk 5 om de bevindingen in de voorgaande hoofdstukken te toetsen. In deze casus zijn verschillende ontwerpen in zowel gelamineerd hout als gelamineerd bamboe uitgewerkt. Vervolgens is gekeken naar de verschillen tussen de materialen. Aan de hand van de uitkomsten van de casus kan gekeken worden hoeveel er bespaard kan worden met een eventueel sterker materiaal.

Alle bevindingen in de voorgaande hoofdstukken zijn samengekomen in de conclusies in hoofdstuk 6. Er is teruggekeken op het gehele onderzoek. Aan de hand van de conclusies en uitkomsten van de onderzoeken zijn ook enkele aanbevelingen opgesteld.

SUMMARY

Wooden structures are a proven sustainable material. But maybe there are materials that can beat wood when it comes to sustainability. Assembly bamboo fits this role. To prove this assumption, this research is done to look at the possibility to design constructions in glued-laminated bamboo as a competing product of glued-laminated timber. The research starts at the base: What is bamboo? To set the image of this product, chapter 2 goes in on the product extensively; What is it? Where does it come from? And how can we put it into use as a raw material for glued-laminated products?

In chapter 3 of this research the subject is mechanical properties. There are some publications on the strength of the product, but the values are very well spread. Especially in Europe and the Netherlands there are no known characteristics published or recorded in standards. To prove the values that are published there were strength tests performed on glued-laminated Moso bamboo. The results of these tests are then compared to the published values and values that came from other researchers.

Chapter 4 is all about the costs of bamboo. This means the research is done to look at the financial costs of the products, but also at the ecological costs. The financial costs are of importance because the product should be able to compete with glued-laminated bamboo. The ecological costs are researched because it is important to look at the big picture and bamboo tends to have a good impact on the environment. On the other hand, bringing in a product from halfway around the world has a big downside on the green image of bamboo.

To evaluate the researched items, they are put into a casus in chapter 5. Two designs are engineered in both glued-laminated bamboo and glued-laminated timber. The results of the two products were then compared. This gives a good look at the differences between the two products and the possible savings a stronger material could establish.

Every single aspect from the research is summoned in chapter 6, where the conclusions are drawn. Because of the outcome of some of the subject in this research some recommendations are done.

Inhoud

VOORWOORD		3
SAMENVATTING		4
SUMMARY		5
INLEIDING		7
1	OPDRACHTOMSCHRIJVING	8
1.1	PROBLEEMSTELLING	8
1.2	DOELSTELLING	8
1.3	VRAAGSTELLING	9
1.4	ONDERZOEKSOPZET	10
2	ONDERZOEK BAMBOE	11
2.1	WAT IS BAMBOE?	11
2.2	GROEIGEBIEDEN BAMBOE	16
2.3	PRODUCTIEPROCES GELAMINEERD BAMBOE	21
3	MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN BAMBOE	26
3.1	INLEIDING	26
3.2	TESTS GELAMINEERD BAMBOE	27
3.3	VERGELIJKING MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN	46
3.4	CONCLUSIES MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN	51
4	KOSTEN	53
4.1	INLEIDING	53
4.2	FINANCIËLE KOSTEN	53
4.3	ECOLOGISCH KOSTEN	55
4.4	CONCLUSIE KOSTEN	60
5	CASUS	61
5.1	INLEIDING	61
5.2	HOOFDBEREKENING	63
5.3	DETAILBEREKENING	69
5.4	CONCLUSIE CASUS	71
6	CONCLUSIE & AANBEVELINGEN	72
6.1	CONCLUSIE	72
6.2	AANBEVELINGEN	74
7	LITERATUURLIJST	75
BIJLAGEN		77

INLEIDING

In dit rapport wordt het onderzoek naar gelamineerd bamboe beschreven. Tijdens een stage, bij het bedrijf Korlam in Sint Oedenrode, is er op eigen initiatief in contact gekomen met gelamineerd bamboe. Korlam doet de engineering van gelamineerde houtconstructies. Dit zijn veelal houtconstructies in vuren, grenen of lariks. Andere houtsoorten worden vrij zeldzaam toegepast. Houtconstructies in naaldhout zijn in Europa veel toegepast. Vooral in de Alpenlanden en Scandinavië wordt gelamineerd hout vaak toegepast. Ook in Nederland wordt gelamineerd hout toegepast, maar vaak is het hout dat in Nederland gebruikt wordt afkomstig uit het buitenland. Leverancier voor Korlam is Korlam zelf, maar voorheen was Kaufmann ook leverancier. Kaufmann is een Oostenrijks houtproducent. Hout is een natuurlijk en veelzijdig materiaal. Het is een duurzaam materiaal en heeft tijdens de groei een positieve invloed op het milieu. De eigenschappen van hout verschillen echter veel per houtsoort. Hardhout is sterker dan naaldhout, maar het is ook vele malen duurder en de groei van hardhout is langer dan dat van naaldbomen. Een product dat qua eigenschappen op hardhout lijkt en qua groei op naaldhout is bamboe. Het is een ontzettend sterk materiaal, maar het groeit sneller dan welke houtsoort dan ook.

Wellicht is bamboe een gat in de markt voor Korlam. Korlam is een Belgische houtleverancier. Bedrijfsleider bij Korlam is Van der Grinten. Hij heeft vele jaren ervaring in gelamineerde houtconstructies.

Om een goed beeld van de kwaliteiten van bamboe te krijgen wordt in dit onderzoek het materiaal bamboe vergeleken met hout. Om deze vergelijking te kunnen maken, wordt er een zelfde project uitgewerkt met beide materialen. Vervolgens wordt er gekeken naar de (verschillen in) economische en ecologische kosten.

1 OPDRACHTOMSCHRIJVING

1.1 PROBLEEMSTELLING

Bamboe wordt al veelvuldig toegepast als constructiemateriaal, voornamelijk in Zuid-Amerika en Zuidoost-Azië. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de bamboestam als element. Dit is niet een manier van toepassen die we in West-Europa zouden hanteren. Door de geringe afmetingen zou de bamboe slechts toegepast kunnen worden in kleinschalige projecten. Door het lamineren van bamboe strips zouden, net als bij gelamineerd hout, elementen van grotere afmetingen kunnen worden gerealiseerd. Met als gevolg een vergroting van de mogelijkheden om bamboe toe te passen.

Hoe kan gelamineerd bamboe een concurrerend constructiemateriaal zijn in Nederland voor gelamineerd hout?

1.2 DOELSTELLING

Korlam is als houtconstructiebureau wel bekend met houtconstructies. Maar de markt wat betreft houten producten wordt steeds groter en innovatiever. Voor Korlam is het belangrijk om het aanbod van producten ook steeds te optimaliseren. Door niet alleen te kijken naar de manier van toepassen van materialen, maar ook door te kijken naar alternatieve materialen, zou Korlam een groter aanbod kunnen creëren. Bamboe zou, vanwege de mogelijke overeenkomsten en uiterlijke gelijkheid aan hout, een logisch materiaal zijn om te onderzoeken. Om de vergelijking van gelamineerd bamboe met gelamineerd hout te maken is er een casus uitgewerkt met beide materialen waarbij met name gekeken is naar de economische en ecologische gevolgen.

Doel 1:

Onderzoek naar de eigenschappen van bamboe als grondstof en het product gelamineerd bamboe.

Doel 2:

Vergelijkingsrapport tussen een gelamineerde bamboestructuur en een gelamineerde houtconstructie op het gebied van kosten en duurzaamheid.

Doel 3:

Het toepassen van de uitkomsten uit de deelonderzoeken in een casus.

1.3 VRAAGSTELLING

Vanuit de probleem- en doelstellingen ontstaat de volgende vraagstelling:

Hoe verhoudt zich het materiaal bamboe ten opzichte van het materiaal hout als we het willen toepassen in gelamineerde constructies?

Deelonderzoek 1: Onderzoek naar de eigenschappen van bamboe als grondstof en het product gelamineerd bamboe.

Projectactiviteit:

Literatuuronderzoek bamboe algemeen. In dit onderzoek zal er een antwoord gegeven worden op bovenstaande vraag en bijhorende deelvragen:

Deelvragen:

1. Wat is bamboe precies?
2. Welke soorten bamboe zijn geschikt als grondstof voor gelamineerd bamboe?
3. Wat zijn de omstandigheden waarin deze bamboes groeien?
4. Wat zijn de mechanische eigenschappen van gelamineerd bamboe?
5. Welke bewerkingen zijn nodig om de bamboe bruikbaar te maken voor constructieve doeleinden?
6. Hoe dient een constructie in gelamineerd bamboe getoetst te worden?
7. Zijn er specifieke aandachtspunten met betrekking tot het detailleren in bamboeconstructies?

Is het mogelijk om met gelamineerde bamboeconstructies te concurreren met gelamineerde houtconstructies? Indien het niet direct mogelijk is, wat moet er gebeuren om het wel mogelijk te maken?

Deelonderzoek 2: Vergelijkingsrapport gelamineerde bamboeconstructie met gelamineerde houtconstructie op het gebied van kosten en duurzaamheid.

Projectactiviteit:

Onderzoek kosten en duurzaamheid. In dit onderzoek wordt er een antwoord gegeven worden op bovenstaande vraag en bijhorende deelvragen:

Deelvragen:

1. Wat zijn de kosten per constructie materiaal?
2. Wat zijn de verschillen in de constructie per constructie materiaal?
3. Wat zijn de kosten voor de logistiek?
4. Wat zijn de verschillen qua productietijd?
5. Wat zijn de verschillen qua bouwmethode en bouwtijd?

Deelonderzoek 3: Het toetsen van de uitkomsten uit de deelonderzoeken in een casus.

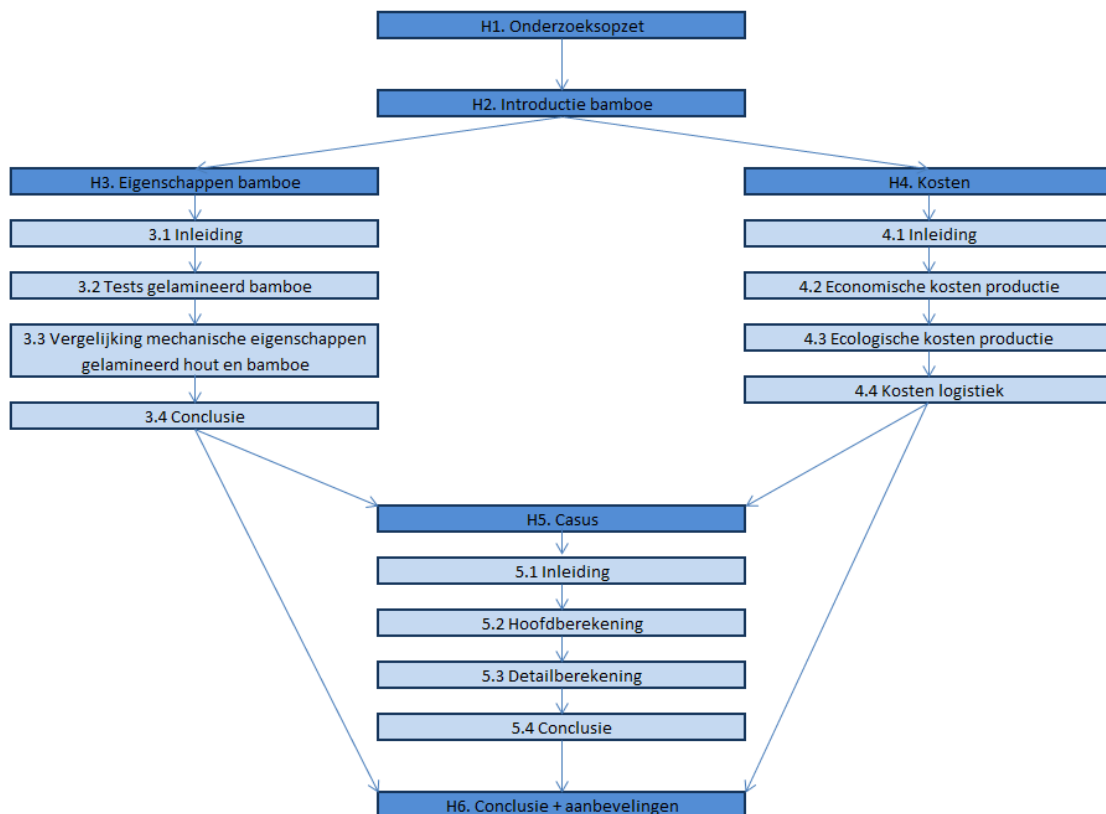
Projectactiviteit:

Het uitwerken van een project in de onderzochte materialen: bamboe en hout. Door het uitwerken van het project wordt inzichtelijk gemaakt wat de verschillen en overeenkomsten zijn tussen een constructie uitgevoerd in bamboe en hout.

Uiteindelijke projectresultaten:

1. Hoofdberekening houten constructie
2. Hoofdberekening bamboe constructie
3. Detailberekening houten constructie
4. Detailberekening bamboe constructie
5. Bouwkundige tekeningen houten constructie
6. Bouwkundige tekeningen bamboe constructie

1.4 ONDERZOEKSOPZET



Figuur 1.1 – Schematische weergave onderzoeksopzet

Het onderzoek is opgesplitst in verschillende aspecten. In figuur 1.1 is een schematische weergave te zien. Dit is ook gelijk aan de hoofdstukken in dit rapport. Door op deze manier te werken worden de tussentijdse conclusies meegenomen in de volgende onderdelen.

2 ONDERZOEK BAMBOE

2.1 WAT IS BAMBOE?

Ondanks de aangewakkerde interesse in bamboe bij een houtconstructiebureau, is bamboe geen hout. Wanneer het gelamineerd wordt heeft het wel de uitstraling van hout en de term bamboehout wordt gebruikt om het te beschrijven, maar officieel is het geen hout. Maar als bamboe geen hout is, wat is het dan wel?

Gras

Bamboe is een grassoort en behoort tot de Gramineae familie en is daarom geen hout- of boomsoort. Er zijn vele soorten bamboe, net zoals er vele soorten bomen en vele soorten hout zijn, die over de hele wereld groeien. Ik beperk me tot de bamboesoorten die bruikbaar zijn in gelamineerde elementen in een constructie. Van de 1500 verschillende bamboesoorten zijn er ongeveer 50 soorten die te gebruiken zijn in de bouw, daarvan steken 2 soorten met kop en schouders boven de overige soorten uit als het gaat om toepassen voor gelamineerde bamboestructies. De bamboes die uitermate geschikt zijn om te gebruiken in gelamineerde constructies zijn Moso uit het oosten van China en Guadua uit Zuid Amerika. Dit heeft voornamelijk te maken met het feit dat deze 2 bamboesoorten de grootste bamboesoorten zijn die we kennen, met als logisch gevolg dat ze de meeste grondstof voor gelamineerd bamboe leveren. Verderop in dit hoofdstuk wordt verder in gegaan op de verschillende bamboes en hun afkomst.

Groeisnelheid bamboe

Omdat bamboe een grassoort is, ligt de groeisnelheid vele malen hoger dan die van bomen. In een half jaar kunnen sommige bamboesoorten een hoogte van wel 30 meter bereiken, met een doorsnede van 30 cm. Een van de vele grote voordelen van bamboe is dat het de eigenschappen heeft van hardhout, maar het groeit sneller dan naaldhout. Eén bamboe wortel levert 15 km bruikbare stam op. Bij het kappen van een boom houdt het leven van de boom op en zal er een nieuwe boom geplant moeten worden voor nieuwe houtproductie. Bamboewortels produceren jaarlijks 4 tot 6 nieuwe scheuten. De scheuten doen er 4 tot 5 jaar over om te volgroeien tot een bruikbare stam en wanneer deze gekapt wordt, zal het wortelstelsel nieuwe scheuten blijven produceren. Dit komt er op neer dat 20% tot 25% van de stammen in een bos gekapt kunnen worden op jaarbasis zonder dat er ontbossing ontstaat¹. De bamboebossen die MOSO International B.V. gebruikt voor de productie van bamboe producten zijn FSC-gecertificeerd². Ondanks dat het niet noodzakelijk is, omdat het een zichzelf herstellende grondstof is, is het voor het toepassen van bamboe producten in veel projecten wel noodzakelijk om een FSC-certificering te hebben.

¹ <http://www.moso.eu/nl/bamboe/duurzame-keuze>, bezocht: januari 2016

² <http://www.moso.eu/nl/bamboe/duurzame-keuze>, bezocht: januari 2016

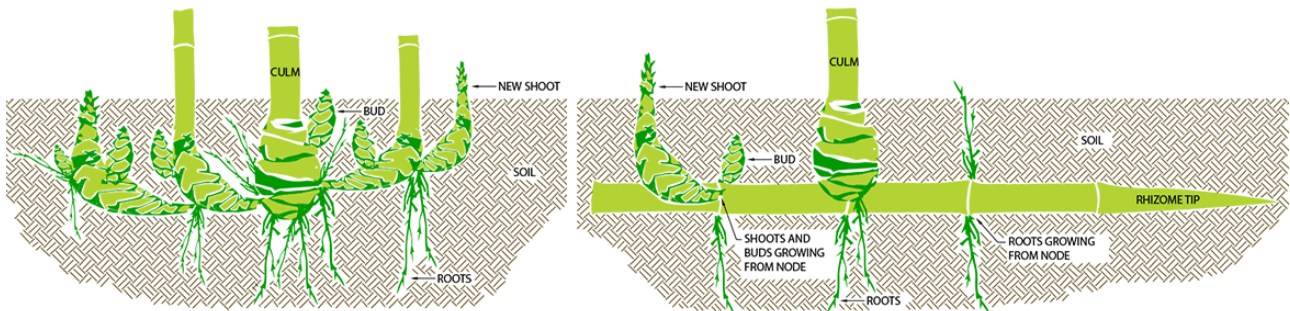
Risico's bamboebloei

Naast de voordelen die bamboe heeft tijdens de groei is er ook een keerzijde, namelijk de bloei eigenschappen van bamboe. Bamboe heeft een bloeicyclus. De lengte van deze cyclus is per bamboe soort verschillend. Er zijn soorten die een bloeicyclus hebben van 10 jaar, maar er zijn ook soorten die een cyclus hebben van meer dan 100 jaar. Alle bamboes die afstammen van dezelfde 'moeder bamboe' zullen, ongeacht van hun plek op aarde gelijktijdig gaan bloeien. Dit is een verschijnsel dat nog steeds niet door mensen wordt begrepen, hoe de bamboe 'weet' dat het moet bloeien. Wat een vervelend feit is over deze bloei, is dat de bamboe na de bloei afsterft³. Bij de bloei worden grote hoeveelheden zaden verspreid. Dit gebeurt in zulke grote hoeveelheden dat dieren die de bamboezaden normaliter eten, nooit alle zaden op kunnen eten, waardoor er altijd nieuwe bamboes zullen beginnen te groeien. Dit is feitelijk een overlevingsmechanisme van bamboe. De nieuwe bamboes zullen snel de oude bamboes hebben vervangen en het bamboe bos hebben hersteld. Maar er zal wel enige tijd overheen gaan, voordat de bamboe genoeg gesterkt is om weer te gebruiken voor productie van constructieve elementen. Dit brengt enerzijds een risico met zich mee, omdat niet exact op voorhand te zeggen is wanneer de bamboe gaat bloeien.

³ Van der Palen, *Een mysterie ontrafeld? Bamboe in bloei*, 1996

2.1.1 Opbouw van bamboe

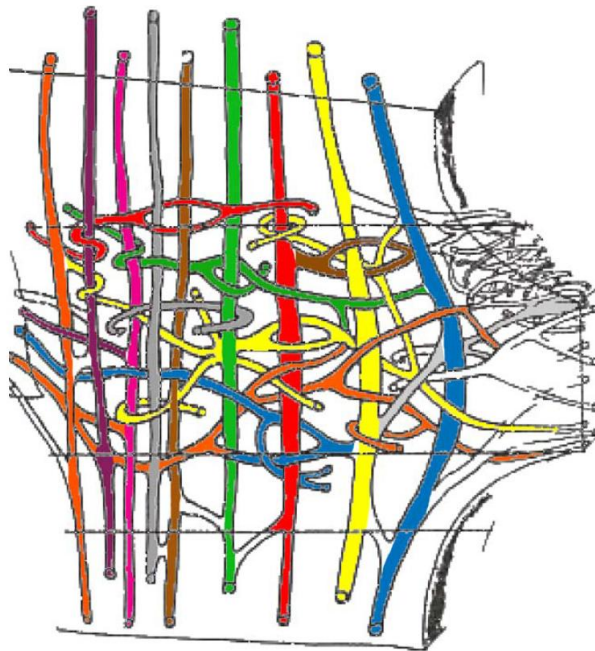
Bamboe is een hardnekkige plant, die wanneer deze ergens groeit, vaak moeilijk te verwijderen is. Het heeft een groot wortelstelsel dat zelf herstellend is. Er zijn 2 soorten bamboes te onderscheiden qua wortelsysteem: pachymorf, of zodevormend en leptomorf, of lopend⁴. In figuur 2.1 staan de 2 opties afgebeeld. De linker afbeelding is een pachymorf wortelsysteem. Hierbij is er een centrale wortel die uitgroeit tot een bamboe scheut en waar tevens nieuwe wortels uit ontstaan, die vervolgens ook weer tot een nieuwe scheut uitgroeien en een nieuwe wortel ontwikkelen. De rechter afbeelding is een leptomorf bamboe. Dit is een wortelsysteem dat zich uitbreidt door middel van rizomen. Dit is een horizontale wortel die op de plekken van de knopen nieuwe scheuten en wortels zal ontwikkelen.



Figuur 2.1 – Wortelsystemen bamboe⁵



Figuur 2.2 – Doorsnede stam met wortel⁶



Figuur 2.3 - Vezelverloop in de knoop⁷

De opbouw van de bamboe wordt al bij de wortels duidelijk. Als we een wortel doorsnijden zien we dat daar holle ruimtes in ontstaan. Deze groeien boven de grond uit tot de segmenten waar de bamboe uit opgebouwd is. Door deze opbouw ontstaat ook de sterke en toch buigzame eigenschap van de bamboe. De knopen van de bamboe fungeren in de bamboestam als een soort veren, waardoor de stijve bamboe stam flexibel wordt en kan meebewegen met wind.

⁴ <http://www.bamboobotanicals.ca/html/about-bamboo/bamboo-growth-habits.html>, bezocht: januari 2016

⁵ <http://www.bamboobotanicals.ca/html/about-bamboo/bamboo-growth-habits.html>, bezocht: januari 2016

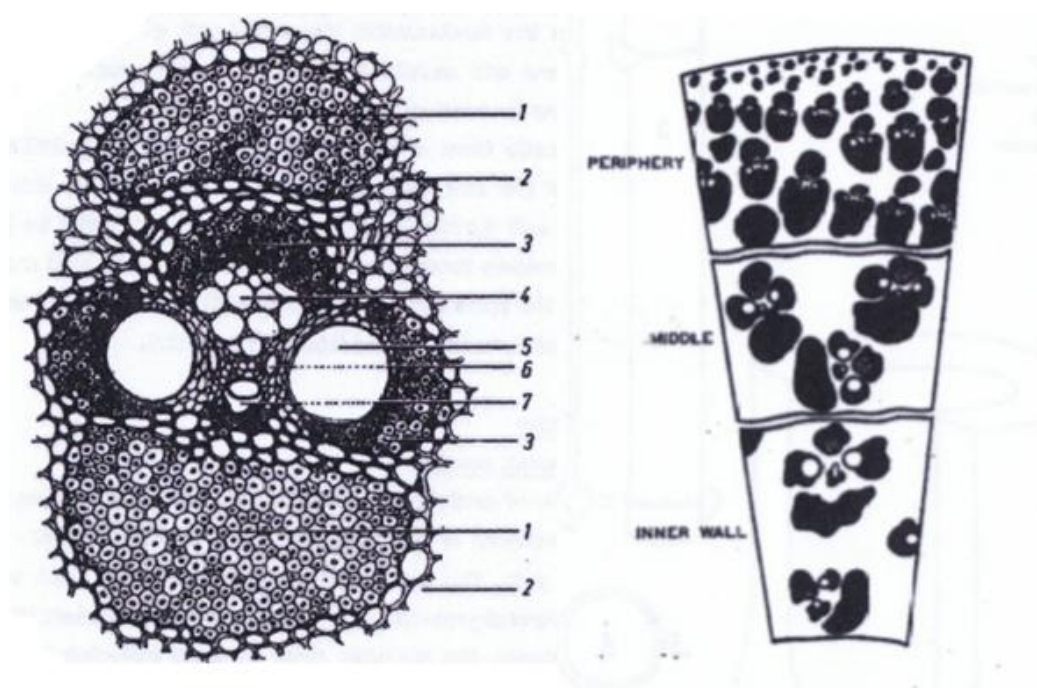
⁶ <http://www.bamboobotanicals.ca/html/about-bamboo/bamboo-growth-habits.html>, bezocht: januari 2016

⁷ Koenen, *Bamboe als constructief bouw materiaal*, 2010

Waar bomen bij hevige wind en storm zullen breken, zal bamboe dat door deze eigenschap niet doen. Deze eigenschap is ook een groot voordeel van bouwen met bamboe in gebieden waar veel seismische activiteit is. Door de flexibiliteit die de bamboe aan de constructie geeft zal het aardbevingen kunnen opvangen door met de trillingen mee te bewegen, in plaats van bezwijken.

De knoop van de bamboe is de enige plek in de bamboe waar de vezels niet verticaal doorlopen. Er zijn in de knoop ook vertakkingen en horizontale vezels. Deze vertakkingen zorgen voor een uiterlijke gelijkheid op hout. Het worden in het eindproduct donkere plekken in het element wat doet denken aan de kwasten die voorkomen in houten elementen. Maar waar de kwasten in hout een verzwakking zijn van het materiaal, geven de knopen in bamboe het materiaal een hogere flexibiliteit en dat zou daarmee een positief effect kunnen hebben op de materiaaleigenschappen.

Het houtachtige deel van de bamboestengel is anders van opbouw dan loof- en naaldhout. De bamboestengel is opgebouwd uit lichtgekleurd parenchym weefsel, een soort merg, met daarin rechte, donkergekleurde vaatbundels die opgebouwd zijn uit vaten en dikwandige vezels. De vezels zorgen, net als bij hout, voor de sterkte van de bamboestengel. Het aantal vaatbundels neemt van de binnenkant naar de buitenkant van de bamboestengel toe. Hierdoor neemt ook de hardheid en de dichtheid toe.



Figuur 2.4 – Links de doorsnede van een vezelstreng⁸, Rechts de vezelverdeling in de bamboe schil⁹

Afbeelding 2.4 is een weergave van de vezelbundel van bamboe. De vezelbundel is opgebouwd uit de volgende onderdelen:

- | | |
|------------------------|------------------------------|
| 1 Vezelstreng | 5 Mataxyleem vat |
| 2 Parenchym cel | 6 Kleiner metaxyleem element |
| 3 Sclerenchym omhulsel | 7 Intercellulaire ruimte |
| 4 Floëem | verkrege van protoxyleem |

⁸ United Nations, *The use of bamboo and reeds in building constructions*, 1972 (Janssen, *Bamboo in building structures*, 1981)

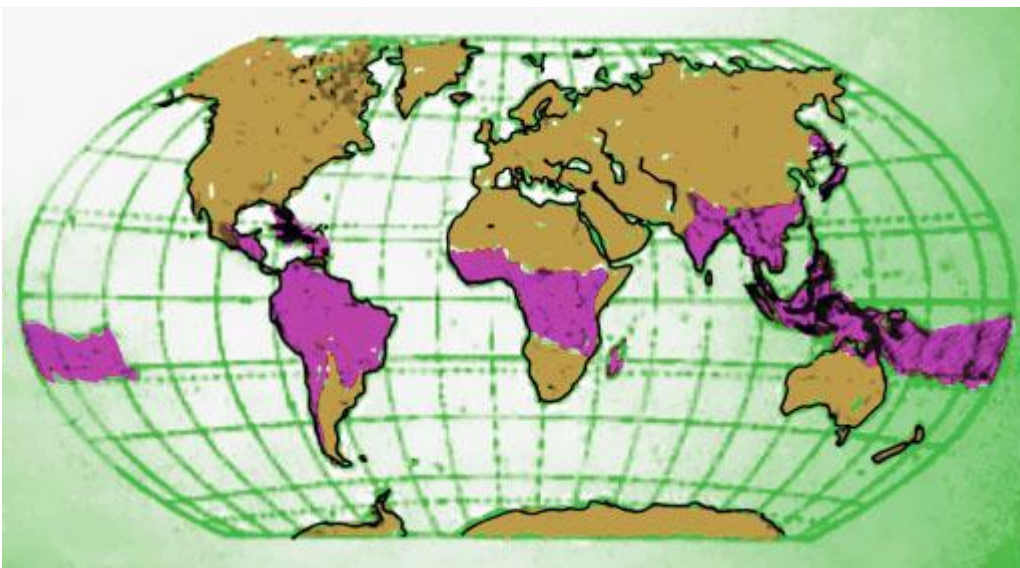
⁹ Grosser and Liese, 1971 (Janssen, *Bamboo in building structures*, 1981)

Er zijn bij verschillende soorten bamboe kleine vormverschillen in de afbeelding hierboven, maar de opbouw van de vezelbundels blijft zoals hier afgebeeld. Doordat bamboe zijn sterkte eigenschappen haalt uit zijn vezels, zoals dat ook bij hout gebeurt, is bamboe een orthotroop materiaal. Dit houdt in dat de sterkte eigenschappen niet in elke richting hetzelfde zijn, zoals dat bij staal wel het geval is. Waar hout met bamboe verschilt is de dichtheid van de vezels. Bij hout is er een gelijke opbouw van vezels over de doorsnede van een houten plank of balk. Bij bamboe is de strip die uit de bamboe stam verkregen wordt verschillend in opbouw. Op figuur 2.4 is de doorsnede van een stuk van de bamboe stam te zien. Hierin wordt de bamboeschil opgedeeld in 3 delen. De buitenkant, het midden en de binnenkant. Er wordt onderscheid gemaakt omdat de opbouw van de bamboe sterk verschilt in het aantal vezels dat zich in de delen bevindt. Het aantal vezels per vierkant centimeter neemt van binnen naar buiten sterk toe. Een losse bamboestrip zal daarom ook verschillen in fysische eigenschappen, afhankelijk van de richting waarin de strip wordt belast.

2.2 GROEIGEBIEDEN BAMBOE

Bamboe groeit over vrijwel de hele wereld. De grotere soorten groeien voornamelijk in tropische en subtropische gebieden in Zuidoost-Azië, Afrika en Midden- en Zuid-Amerika. In het oosten van China groeit de Moso bamboe. Samen met India en Birma is China een van de meest productieve landen. In Afrika groeit in verhouding tot Zuidoost-Azië en Zuid-Amerika aanzienlijk minder bamboe. Hierdoor is ook het gebruik ervan voor constructieve doeleinden minder. In Zuid-Amerika is Guadua de grootste bamboe. Zowel Guadua als Moso is een reus onder de bamboes met een lengte tot 30 meter en een doorsnede tot 30 centimeter.

In afbeelding 2.5 is in magenta de groeigebieden van bamboe wereldwijd weergegeven. Opvallend is dat het vooral rond de evenaar voor komt en hierdoor is het in Europa een minder vaak toegepast product. Ook omdat, wanneer het in Europa toegepast zou kunnen worden, het hoe dan ook van ver geïmporteerd dient te worden. Dit zorgt voor hogere kosten, waardoor eerder gekozen wordt voor een vergelijkbaar materiaal dat in Europa voor handen is.



Figuur 2.5 – Groeigebieden van bamboe wereldwijd¹⁰

Toch zijn er bedrijven die bamboeproducten ontwikkelen en aanbieden op de Europese markt. Deze producten zijn vaak voor interieur, vloer of vlonders. Maar ook gelamineerde bamboebalken worden aangeboden. Deze hebben dan geen vermelding van sterkte-eigenschappen, en dienen voor esthetische toepassing en niet voor dragende constructies. In de Verenigde Staten is het hoofdkantoor van Lamboo gevestigd. Dit bedrijf produceert gelamineerd bamboe van Guadua bamboe uit Zuid-Amerika. De toepassing van gelamineerd bamboe is in het geval van Lamboo wel constructief. Er zijn meerder projecten die uitgevoerd zijn in gelamineerd bamboe, die vergelijkbaar zijn met het toepassen van gelamineerd hout in Nederland.

¹⁰ <http://www.lubanhouse.com/over-bamboe>, bezocht: januari 2016

2.2.1 Bamboe in Azië

In Azië is bamboe niet alleen een veelgebruikt bouw materiaal voor woningen, maar is bamboe ook een belangrijke plant in de Chinese cultuur. Bamboe is een van de vier planten die de vier seizoenen vertegenwoordigen. In Japan wordt een bamboebos gebruikt om heiligdommen te beschermen tegen kwaad. En vele Boeddhistische tempels hebben bamboe groeven. In India staat gefermenteerde bamboe erom bekend dat het een middel is tegen impotentie, onvruchtbaarheid en menstruele pijn. Kortom, bamboe is niet alleen geschikt als bouw- of constructiemateriaal, maar heeft ook in de cultuur in Zuid Oost Azië een grote invloed.

De meest geschikte soort bamboe die in Azië voor komt is de *Phyllostachys Edulis*, ook wel Moso genoemd. Deze bamboe kenmerkt zich door een gladde, glanzende stam. Hierdoor is hij ook zeer gewild in de interieurbouw. De Moso bamboe wordt toegepast in strakke interieurs en is door zijn karakteristieke hardheid enorm slijtvast. Daarmee is Moso bamboe uiterst geschikt voor vloeren. In Nederland is tevens een importeur van Moso bamboe gevestigd. Via deze importeur, Moso International BV, zijn vele materialen gemaakt van Moso bamboe leverbaar. Van vloeren tot massieve platen en van vlonders tot gelamineerde balken. Maar ook hier geldt dat de afmetingen van de te realiseren gelamineerde balken beperkt zijn. Zonder vingerlassen zijn de standaard lengtes 2,44 meter¹¹. De aangewezen toepassing voor deze balken is daarmee kozijnhout. Het is de ideale vervanger van hardhout. Bamboe heeft een hogere dimensievastheid en heeft een strakke afwerking. Naast gelamineerde balken levert Moso-bamboe ook Density bamboe, wat een andere benaming is voor Strand Woven bamboe. Deze is geperst en eventueel gekleurd, zodat het de uitstraling heeft van tropisch hardhout.

Voor de kleinere toepassingen en niet direct voor de hoofdconstructie, is bamboe al verkrijgbaar op de Nederlandse markt. Hier is echter alleen nog niet veel vraag naar en de prijs zal alsnog hoger liggen dan de prijs van hardhout, maar we kunnen hier de vraag stellen of we puur naar de economische kosten moeten kijken, of ook in moeten zien dat het toepassen van bamboe in de plaats van hardhout op de lange termijn een enorm ecologisch verschil kan betekenen. Hier wordt verder op in gegaan in hoofdstuk 4 (kosten).



Figuur 2.6 – Foto van een Moso bos¹²

¹¹ <http://www.moso.eu/nl/producten/balken-platen-fineer/massieve-balk>, bezocht: januari 2016

¹² <http://www.bamboogarden.com/Phyllostachys%20edulis%20%20Moso.htm>, bezocht: januari 2016

2.2.2 Bamboe in Zuid-Amerika

In Zuid-Amerika wordt voornamelijk gebruik gemaakt van de *Guadua Angustifolia*, kort gezegd *Guadua*. Er zijn drie belangrijke redenen om met bamboe te bouwen in Zuid-Amerika: het is een goedkope grondstof, bamboe is gemakkelijk te verkrijgen en door de flexibiliteit van de bamboe is het een goed bouw materiaal in de vele aardbeving gevoelige gebieden in Zuid-Amerika. Toch staat bamboe bekend als bouw materiaal voor de armen, de bovenste laag van de samenleving in veel van de Zuid-Amerikaanse landen staat er zelfs op om beton te gebruiken bij de bouw van hun huizen, omdat dat duurder is en meer status geeft. In tegenstelling tot Zuid Oost Azië, is men in Zuid Amerika vrij nuchter onder het toepassen van bamboe en wordt het vaak alleen gebruikt door de armere lagen van de bevolking.

De *Guadua* bamboe is qua grootte ongeveer gelijk aan de Moso bamboe uit Azië. Een groot verschil tussen de *Guadua* bamboe en de Moso bamboe is dat de Moso bamboe een glanzende stam heeft en de *Guadua* bamboe is dof. Dit uiterlijke kenmerk heeft geen invloed op hoe de bamboe eruit ziet die uiteindelijk wordt gebruikt in halffabricaten. Er is nauwelijks verschil in uiterlijk tussen gelamineerd Moso bamboe of gelamineerd *Guadua* bamboe.



Figuur 2.7 – Foto van een *Guadua bos*¹³

¹³ <http://www.bambooinvitro.com/about-bamboo-in-vitro-costa-rica-tissue-technology-production/mission-and-vision>, bezocht: januari 2016

2.2.3 Bamboe in Nederland

Zoals te zien in figuur 2.5 in hoofdstuk 2.2 is te zien dat bamboe het beste in tropische en subtropische klimaten groeit. Maar toch zie je in Nederland de afgelopen jaren een stijgende interesse in bamboe. In tuinen wordt het al vaker toegepast. In Steenwijkerwold is een zogenaamde jungletuin en bamboekwekerij gevestigd. Deze tuin is een uit de hand gelopen hobby van de heer Prins. Hij is in 1990 begonnen om bamboe, die hij op reis in Azië is tegen gekomen, te planten in Nederland. Het gevolg is een weiland vol met bamboe en andere exotische planten. Prins gaat nog vaak naar het buitenland om op zoek te gaan naar nieuwe soorten die eventueel in Nederland ook kunnen overleven. Het grootste probleem hierbij is de vorst. Het is niet het geval dat alle bamboesoorten niet tegen vorst kunnen, maar veel soorten zullen blad verliezen bij te langere periodes van kou. En het zal de groei van de bamboes niet ten goede komen. Prins probeert heel veel nieuwe soorten naar Nederland te halen en zal pas nadat ze getest zijn en een aantal jaren geproefd hebben aan het Nederlandse klimaat in de verkoop gaan. Afhankelijk van hoe streng de winters zijn kan hij een redelijke voorspelling doen of een bamboe kan gedijen in Nederland. Dit geeft natuurlijk nog geen garantie, maar het biedt wel een redelijke zekerheid. Eenzelfde pionier op het gebied van bamboe kweken is de heer Van der Palen van bamboekwekerij Kimmei. Hij heeft een soortgelijke tuin als Prins, gelegen in Valkenswaard. Waar Prins zijn tuin redelijk verwilderd heeft om het idee van een jungle te creëren, heeft Van der Palen er nog enige structuur in aangebracht.

Wat vrij snel duidelijk wordt, tijdens een bezoek, op 15 mei 2015, aan de bamboekwekerij van Van der Palen, is dat een bamboeproductie met als doel constructieve elementen niet direct haalbaar is. Ondanks dat er reuzebamboes gekweekt worden, die het goed doen in Nederland, zijn er geen afmetingen bij die het mogelijk zouden maken om gelamineerd bamboe te produceren. Met stamdiameters van maximaal 6 à 7 centimeter en een wanddikte van nog geen 1 centimeter zijn de doorsnedes die uit de stammen te halen zijn te klein om te verlijmen. Bamboeproductie voor toepassingen in Strand Woven bamboe zijn dan een logischer keuze.

Er kan geconcludeerd worden dat het nog niet mogelijk is om een bamboeproductie in Nederland op te zetten, puur ten behoeve van gelamineerde bamboestructies. Het zou eventueel mogelijk zijn als er gewerkt gaat worden met Strand Woven bamboeproducten of kleinschalige bamboe constructies, maar de vraag is of, puur naar constructies gekeken, daar een markt voor is.



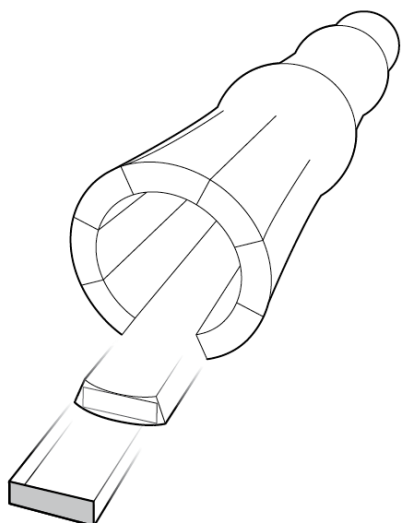
Figuur 2.8 – Foto's van de bamboetuin van Van der Palen in Valkenswaard

De foto's in figuur 2.8 zijn gemaakt in de tuin van Van der Palen in Valkenswaard. Hij heeft meerdere soorten bamboe in de tuin en op kweek. Ook voor verkoop. De linker foto is de *Phyllostachys vivax* 'Aureocaulis' die winterhard is tot ongeveer -18°C ¹⁴. In Nederland kan deze bamboe een hoogte halen van 6 tot 10 meter¹⁵. Bamboesoorten die in normaal in tropisch of subtropisch klimaat groeien en daar 20 tot 30 meter hoogte bereiken, zullen in Nederland, wanneer ze vorstbestendig zijn, maximaal 10 tot 12 meter hoog worden.

¹⁴ Van der Palen, gesprek 15 mei 2015

¹⁵ Van der Palen, gesprek 15 mei 2015

2.3 PRODUCTIEPROCES GELAMINEERD BAMBOE



Om bamboe toe te passen in de traditionele manier van bouwen is er weinig arbeid nodig. De stammen van de bamboe worden in zijn geheel toegepast en vaak op een eenvoudige manier aan elkaar verbonden om een constructie op te zetten. Om op een modernere manier te bouwen zullen er balken vervaardigd moeten worden uit bamboe. In Nederland is het gebruikelijk om te werken met balken met een rechthoekige doorsnede. Uit ronde boomstammen worden ook rechthoekige doorsnedes gezaagd. Door houten latten te vingerlassen en te verlijmen zijn enorme afmetingen te realiseren. Omdat bamboe hol is ligt het bij bamboe gecompliceerder. Hierdoor is het ook gunstiger om hiervoor bamboe te gebruiken met een lange stam en een grote doorsnede. Hoe hoger de bamboe, hoe dikker de stam, hoe meer bruikbaar materiaal je uit de stam kunt halen.

Figuur 2.9 – Bamboe strip zoals deze wordt verkregen uit een bamboe stam¹⁶

Er zijn twee methoden om balken te vervaardigen uit bamboe. Een methode is om de bamboe stammen te vervezelen. Dit komt neer op het desintegreren van de bamboe tot losse vezelstrengen. Door deze vezelstrengen vervolgens te verlijmen kun je elke gewenste vorm en doorsnede realiseren. Dit wordt ook wel Solid Bamboo of Strand Woven Bamboo genoemd¹⁷. Een andere manier is Glulam Bamboo of Engineered Bamboo, of gelamineerd bamboe. Hierbij gebeurt eigenlijk hetzelfde als bij gelamineerd hout. Kleinere houten latten worden samen gelijmd tot een grotere doorsnede. Bij bamboe is dit alleen iets bewerkelijker omdat er geen grote doorsnedes uit de bamboe stammen te halen zijn. Waar bij hout breedtes tot 280 mm nog haalbaar zijn, is dit bij bamboe maar zo'n 20 mm. Deze worden dan verlijmd tot een doorsnede die gebruikt kan worden als constructieve ligger met een kleinere overspanning. Maar als deze kleinere doorsnedes weer verlijmd worden, kunnen grotere doorsnedes gehaald worden en kom je in de richting van wat ook haalbaar is met gelamineerd hout.

¹⁶ <http://www.moso.eu/en/bamboo/how-it-s-made>, bezocht: januari 2016

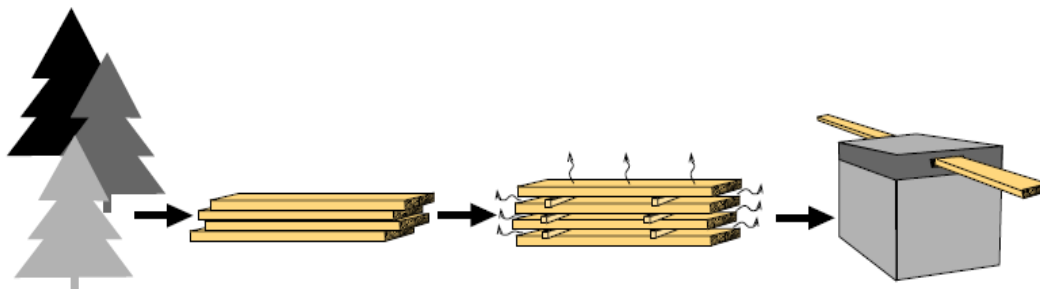
¹⁷ <http://www.solidbamboo.nl/twee-soorten-bamboe>, bezocht: januari 2016



Figuur 2.10 – De verlijming van meerdere gelamineerde bamboe elementen tot een groter element¹⁸

2.3.1 Productie standaard gelamineerd hout

De productie van gelamineerd bamboe is identiek aan de productie van gelamineerd hout. Alleen omdat er uit bomen grotere afmetingen gezaagd kunnen worden dan uit bamboe stammen, is er voor de productie van gelamineerd bamboe nog een extra stap nodig voordat er gelamineerde bamboe elementen geproduceerd kunnen worden.

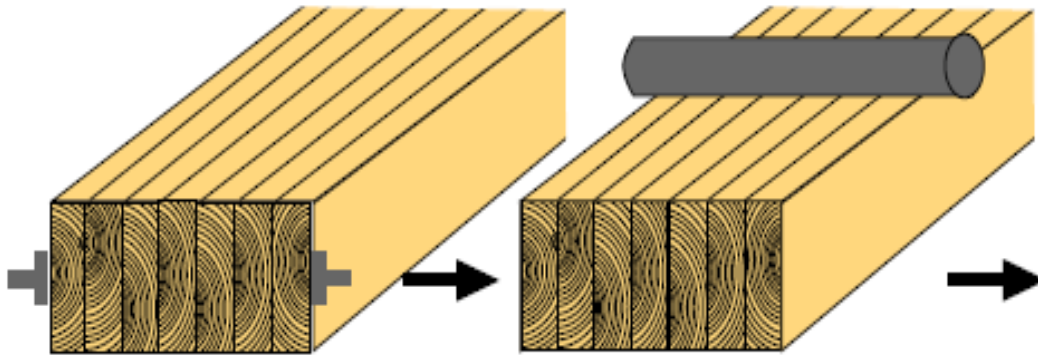


Figuur 2.11 – Productie van bos tot zaaghout¹⁹

Om het hout gereed te maken voor de verlijming, wordt het na kappen en zagen gedroogd. Door het drogen van het hout zal het hout licht vervormen. Vervolgens wordt het hout op maat geschaafd voor productie. Door houten latten te vingerlassen is een vrijwel oneindige lengte te realiseren. De lengte van gelamineerde liggers wordt gelimiteerd door wat logistiek mogelijk is. De elementen moeten natuurlijk nog wel te vervoeren zijn.

¹⁸ www.lamboo.us, bezocht: januari 2016

¹⁹ <http://www.svensktlimtra.se/no/limHTML/2U231.html>, bezocht: januari 2016



Figuur 2.12 – Verlijmen en schaven gelamineerd element²⁰

Wanneer de houten latten op de juiste lengte zijn gemaakt worden ze tegen elkaar gelijmd en samengedrukt. Door de druk vloeit de lijm goed in de vezels en krijg je een sterke verbinding. Als de lijm is uitgehard wordt het element op de juiste maat gezaagd en geschaafd. Ook worden er volgens de wens van de klant daarna pasbewerkingen uitgevoerd. Bijvoorbeeld gaten om bouten of schroeven in een verbinding toe te passen. Of slieten om stalen platen te verbinden. Dat is in een notendop hoe gelamineerd houten elementen worden geproduceerd.

²⁰ <http://www.svensktlimtra.se/no/limHTML/2U231.html>, bezocht: januari 2016

2.3.2 Productieproces gelamineerd bamboe

Om constructieve elementen te vervaardigen uit bamboe is nog een extra bewerking nodig. De bamboepalen worden gesplitst, waarbij grove licht gebogen strips ontstaan. Deze strips worden vervolgens gedroogd en geschaafd tot ze een rechthoekige doorsnede hebben. De bamboe-strips zijn nu ongeveer 1 cm dik en 2 cm breed. De bamboe-stammen zijn om het geheel eenvoudiger hanteerbaar te maken, afgekort op lengtes van 2,5 meter. De strips worden op de gewenste lengte gemaakt d.m.v. lassen, op elkaar gelijmd en onder hoge druk samen geperst tot planken met een dikte van één bamboe strips breed. Deze planken kunnen gezien worden als de latten die op elkaar gelijmd worden bij het produceren van gelamineerd hout. Waar de latten bij gelamineerd hout bestaan uit enkel geschaafde doorsneden hout, bestaan de latten bij gelamineerd bamboe uit van bamboe-strips samengestelde elementen.

Verlijming gelamineerd bamboe

De afmeting die de elementen uiteindelijk krijgen is afhankelijk van de gewenste afmetingen van een klant, of de juiste afmeting om toe te passen in verlijming van een grotere afmeting. Wat er eigenlijk gebeurt is dat de gelamineerde ligger wordt opgebouwd uit kleinere gelamineerde liggertjes. De vraag rijst meteen of er ondertussen niet meer lijm dan bamboe in een bamboe element zit. Maar door de technieken die worden toegepast met verlijmen is slecht 1% van een gelamineerde bamboe element lijm. 99% is op deze manier nog steeds bamboe. En dan maakt het niet uit hoe vaak iets wordt verlijmd, het blijft 1% lijm en 99% bamboe²¹. Bij gelamineerd hout is het ook zo dat de lijm in het element niet onder doet voor het hout qua fysieke eigenschappen. Het hout blijft de zwakste schakel. Dit is bij bamboe ook het geval. De lijm die wordt toegepast is dusdanig sterk dat de bamboe nog steeds het kritische materiaal is.

Verlijming Strand Woven bamboe

Bij Strand Woven bamboe worden de strengen van een bamboestam gedroogd en daarna volledig ondergedompeld in een bad met hars. Vervolgens worden de bamboe strengen in een pers samengedrukt. Door de druk kleven de hars en de vezels sterk aan elkaar en ontstaat er een element van bamboe strengen, bij elkaar gehouden door hars. Hiermee kunnen ook kleinere doorsneden gemaakt worden. Maar hierbij is het percentage lijm in een element vele malen hoger dan bij gelamineerd bamboe. Maar waar bij gelamineerd bamboe de lijm maar 1% van het totale materiaal is, bevat een element gemaakt van Strand Woven bamboe uit ongeveer 10% hars en 90% bamboe²². Dit is al meer dan bij gelamineerd bamboe, maar nog steeds is het grootste gedeelte bamboe.

²¹ Gesprek Ecobam, 4 november 2015

²² <http://www.bambooindustry.com/blog/strand-woven-bamboo-flooring-process.html>, bezocht: januari 2016



Figuur 2.13 – Links de doorsnede van een gelamineerd bamboe element, Rechts een las in een bamboe strip

Links: Doorsnede van een gelamineerde bamboe balk. In deze afbeelding is goed te zien hoe het element is opgebouwd. De bamboe strips worden eerst 'staand' verlijmd waardoor latten ontstaan die in elke gewenste breedte te maken zijn. Deze latten worden vervolgens op elkaar gelijmd om de balk in de hoogte op te bouwen. Op deze manier is gelamineerd bamboe op dezelfde manier opgebouwd als gelamineerd hout. De verlijmde bamboe strips fungeren als lamellen. Door de bamboe op deze manier toe te passen en niet 90 graden gedraaid, wordt het mechanische verschil tussen de binnenzijde en de buitenzijde van een bamboe strip omzeild.

Rechts: De gepatenteerde las die toegepast wordt in Moso producten. Dit is een schuine las met een soort haakvorm waardoor er zowel druk als trek opgenomen zou kunnen worden. Op de foto is te zien dat de verbinding niet helemaal goed verlijmd is. Er bevinden zich holle ruimten tussen de twee bamboe strips, waardoor de aansluiting van de twee strips niet optimaal is. Dit zou van invloed kunnen zijn op de sterkte van de bamboestrip en op de sterkte van het element.

3 MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN BAMBOE

3.1 INLEIDING

Onderzoek

Er zijn verschillende publicaties over de mechanische eigenschappen van bamboe. Veel van deze publicaties gaan over de eigenschappen van bamboe-stammen. Dit is alleen interessant als er constructies gemaakt worden met hele bamboe-stammen. Die worden veelvuldig toegepast in de traditionele bouwmethode in Azië en Midden- en Zuid Amerika. Er is in Nederland weinig onderzoek gedaan naar de mechanische eigenschappen van gelamineerd bamboe. Bij SHR (Stichting Hout Research) in Wageningen zijn in opdracht van een klant proeven gedaan op gelamineerd bamboe. Omdat deze gegevens strikt voor de opdrachtgever zijn worden ze niet vrij gegeven. Er zijn wel enkele onderzoeken gedaan door studenten. Zo heeft De Vos vanuit de Hogeschool Van Hall in Larenstein in samenwerking met SHR een onderzoek gedaan naar de verschillen tussen Guadua bamboe en Moso bamboe. Dit is een zeer interessant onderzoek, omdat dit de twee grote bamboesoorten zijn die goed toepasbaar zijn in gelamineerde elementen. Een ander onderzoek is gedaan door Vos vanuit de Technische Universiteit Delft. Dit onderzoek richt zich op het toepassen van gelamineerd bamboe in hoogbouw in aardbeving gevoelig gebied.

Publiciteit

Er zijn twee bedrijven die eruit springen qua publiciteit over gelamineerd bamboe. In Lichtfield (Verenigde Staten) is het hoofdkantoor van Lamboo gevestigd. Lamboo is een grote leverancier van gelamineerde bamboestructies. Voor zowel gebouwen, maar ook voor vliesgevels en gevelbekleding. In Europa is Moso een grote leverancier van bamboeproducten. De producten die Moso aanbiedt zijn vooral voor interieur toepassingen en balkmateriaal voor het toepassen als kozijnen.

Normen

Omdat er nog geen publicaties zijn van uitgebreide materiaaltesten is het nog niet duidelijk wat de mechanische eigenschappen van gelamineerd bamboe exact zijn. En met welke karakteristieke waarden gerekend zou moeten worden bij het doen van een statische berekening. Om hierin een eerste stap te zetten is er vanuit het SHR een richtlijn opgesteld waaraan bamboe halffabricaten aan moeten voldoen. Deze richt zich vooral op de kwaliteit van de bamboeproducten. Maar er wordt ook in geadviseerd hoe de sterkte eigenschappen van gelamineerde bamboe elementen ten behoeve van constructieve doeleinden bepaald moeten worden. Dit dient te gebeuren aan de hand van NEN-EN 408. En berekening van de constructie dient te gebeuren aan de hand van Eurocode 5²³. Dit betekent dat een constructie van gelamineerd bamboe, volgens dezelfde norm berekend wordt als een constructie van gelamineerd hout. Dit omdat bamboe en hout qua karakteristieke en fysieke eigenschappen sterke overeenkomsten hebben.

²³ SKH, *Beoordelingsgrondslag BGS-005*, Certificatie-instelling SKH, 2014

3.2 TESTS GELAMINEERD BAMBOE

Dankzij Ecobam, een bamboeleverancier uit Ravenstein, heb ik zelf sterkte tests uit kunnen voeren op gelamineerd bamboe. De bamboe die ik tot mijn beschikking heb gekregen is Moso bamboe. De bamboe is afkomstig van Green-Boo die hun productie in Shanghai in China hebben. De uitkomsten van mijn beproevingen zal ik verderop in dit hoofdstuk met de gepubliceerde waarden van fabrikanten en andere onderzoeken vergelijken.

3.2.1 Inleiding testen

Om een beeld te krijgen van de mechanische eigenschappen van gelamineerd bamboe, zijn voor dit onderzoek tests gedaan op proefstukken die verkregen zijn van Ecobam. Ecobam is een leverancier van gelamineerde bamboeproducten. Ecobam is een dochter onderneming van Green-Boo. Dit is een productiebedrijf dat is gevestigd in Shanghai. De producten die ze aanbieden zijn voornamelijk vlonderplanken en gevelbekleding, maar ook balken. Deze balken kunnen in Nederland echter niet als dragende elementen worden toegepast, omdat er onvoldoende testresultaten zijn om de karakteristieke waarden van het product te weten. Op de website²⁴ van Green-Boo staan wel enkele karakteristieke waarden vermeld, maar er is niet expliciet vermeld hoe deze waarden tot stand zijn gekomen. In China zijn de gelamineerde bamboe balken wel toegepast als dragende elementen. Ecobam heeft plankmateriaal voor het onderzoek beschikbaar gesteld, waarvan de proefstukken op maat zijn gezaagd bij een professionele zagerij, Machinaal Timmerbedrijf Van der Heijden in Geldrop. Hierdoor zijn uiteindelijk 45 proefstukken getest door middel van een 4-punts buigproef. Deze wordt voorgeschreven door NEN-EN 408. Uit het testen van de bamboe met een 4-punts buigproef kunnen minimaal twee belangrijke waarden verkregen worden. Door de proefstukken te buigen tot bezwijken wordt een maximale buigsterkte verkregen en door de doorbuiging te vergelijken bij een bepaalde toename van de kracht, kan de elasticiteitsmodulus worden berekend. Als de maximale buigsterkte bekend is kan daarmee ook een druk- en een treksterkte berekend worden volgens NEN-EN 384.

Richtlijn voor testen

Voor een goede uitkomst dient de test die wordt uitgevoerd aan een aantal richtlijnen te voldoen. Deze staan omschreven in de BGS-005 gepubliceerd door SHR in Wageningen. Hierin staat beschreven dat de test voor de sterkte eigenschappen dient te gebeuren volgens NEN-EN 408, gebaseerd op 40 balken afkomstig uit drie verschillende productiebatches. Bij het bezoek aan SHR is gesproken met mevrouw Van der Zee over het testen van gelamineerd bamboe op deze manier. Het komt er dan op neer dat er een minimaal aantal van 40 elementen getest moeten worden die een hoogte hebben van 150mm. Voor de 4-punts buigproef die omschreven staat in de norm betekent dit het testen van een balk met een lengte van 3 meter lang. Dit zou neer komen op bijna 1,5 m³ gelamineerd bamboe. Dat betekent een investering van circa € 3.400,-. Op advies van Van der Zee is besloten om de tests uit te voeren op kleinere proefstukken. Dit is niet volledig zoals het voorgeschreven is, maar geeft een goede indicatie van de werkelijke karakteristieke waarden.

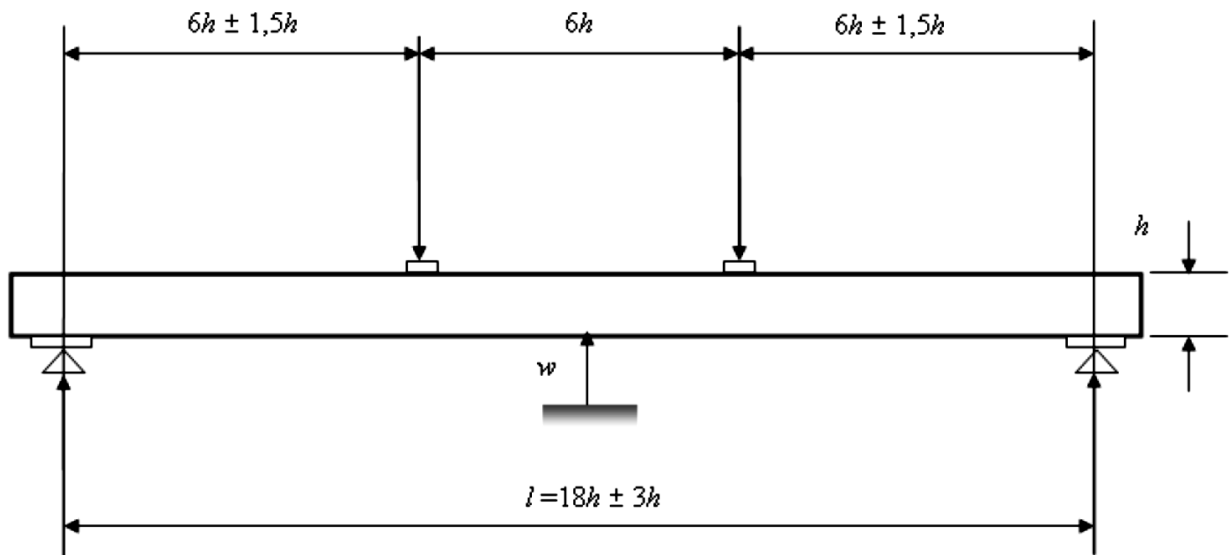
²⁴ <http://green-boo.com/Characteristics.asp>, bezocht: januari 2016



Figuur 3.1 – Links proefstukken t.b.v. trek- en drukproeven, Rechts proefstukken t.b.v. 4-punts buigproef en gelamineerde balk

Door Ecobam is een aantal vlakke planken en een balk geleverd. De planken hadden een afmeting van 18x140mm en een lengte van 3660mm. Uit een doorsnede van 18x140mm zijn vervolgens drie doorsnedes van 18x40mm gezaagd met een lengte van 720mm. Op die manier werd voldaan aan de eis uit de norm dat de lengte van de proefstukken 19 maal de hoogte van het proefstuk dient te zijn. De balk had een afmeting van 95x95mm met een lengte van 2620mm. Vervolgens is besloten om de proefstukken te zagen voor zowel druk- als trekproeven, omdat de uitkomsten van die proeven, samen met de totale uitkomst, een beter beeld geven van het product. De proefstukken die gebruikt zijn in de trekproeven hadden de afmeting van 20x20mm met een lengte van 300mm conform de norm en de proefstukken die gebruikt zijn in de drukproeven hadden een afmeting van 45x45mm met een lengte van 270mm.

3.2.2 4-punts buigproeven



Figuur 3.2 – Eisen aan proefopstelling 4-punts buigproef²⁵

In de bovenstaande afbeelding 3.2 is weergegeven welke eisen er gesteld worden aan de proefopstelling voor het testen van de 4-punts buigproef. Er zijn twee beproevingen beschreven in de norm voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus in buiging. Hierbij dient er gebruik gemaakt te worden van een meetattribuut om de lokale verplaatsing te bepalen, een zogenaamde *Gauge*. Doordat er voor het onderzoek geen gebruik gemaakt kon worden van dit attribuut, werd de globale elasticiteitsmodulus gaan bepaald. Dit is gedaan met behulp van een meetklok die tot $0,01mm$ nauwkeurig de verplaatsing kan meten. De formule voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus is de volgende:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb h} \right)}$$

Hierin is G de afschuifmodulus die voor het bepalen van de sterkteklasse, aangenomen moet worden als oneindig. Daarmee vervalt de laatste breuk onder de deelstreep en ziet de te gebruiken formule er als volgt uit:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right)}$$

Hierin is $E_{m,g}$ de globale elasticiteitsmodulus, ΔF de krachtstoename tussen $0,1F_{max}$ en $0,4F_{max}$, Δw de toename van de verplaatsing in punt x veroorzaakt door de krachtstoename ΔF , b de breedte van het proefstuk, h de hoogte van het proefstuk, l is de afstand tussen de opleggingen. De breedte en hoogte van alle proefstukken is met een schuifmaat nagemeten met een nauwkeurigheid van $0,02mm$.

²⁵ NEN-EN 408+A1

Maximale buigspanning

Voor het bepalen van de maximale buigsterkte is dezelfde opstelling nodig. Alleen dient het proefstuk tot bezwijken te worden beproefd en hoeft de verplaatsing niet meer vastgelegd te worden. Deze proef dient voorafgaand aan de proef voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus ook minstens 10 keer uitgevoerd te worden om de F_{max} te bepalen. Die is nodig om de krachtstoename ΔF , $0,1F_{max}$ en $0,4F_{max}$, uit te rekenen. Voor het bepalen van F_{max} geldt de volgende formule:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

De proefstukken zijn allemaal opgemeten en gewogen. De doorsnede van de proefstukken is bepaald op een nauwkeurigheid van $0,02\text{mm}$ en de lengte op 1mm . De weging van de proefstukken is gebeurd met een nauwkeurigheid van 1 gram. Deze gegevens zijn verwerkt in een overzicht dat terug is te vinden in de bijlage I, Rapport sterktetests. Met de afmetingen en gewichten van de proefstukken is bepaald wat het soortelijk gewicht van de gelamineerde bamboe is. Het soortelijk gewicht is uitgekomen op 698 kg/m^3 . Dit komt overeen met de waarde die op de website van de producent terug te vinden is. Daar wordt aangegeven dat het soortelijke gewicht tussen de 700 en 750 kg/m^3 ligt²⁶.

Het bepalen van de maximale kracht voor de 4-punts buigproef is bepaald op de proefstukken nummer 33 tot en met nummer 45. Hierbij is de kracht die uit de beproeving van proefstuk nummer 37 is gekomen, niet meegenomen. Proefstuk 37 is bij wijze van experiment beproefd over de zwakke as van het element. Dit heeft niets opgeleverd, omdat door de grote vervorming de veiligheidsschakelaar van de testapparatuur ingedrukt werd, waardoor de machine af sloeg. Omdat deze beproeving mogelijk invloed heeft gehad op de eigenschappen van de beproeving over de sterke as is gekozen om de uitkomsten van dit proefstuk niet mee te nemen. De gemiddelde F_{max} van de proefstukken 33 tot en met 45 is 3673N . De daarbij horende krachten voor het beproeven van de elasticiteitsmodulus zijn daarmee vastgesteld op 367N en 1469N . De verplaatsing die tussen deze krachttoename optrad is opgemeten en verwerkt tot de elasticiteitsmodulus van de proefstukken. De elasticiteitsmodulus is van alle overige proefstukken bepaald. Volgens de NEN-EN 384 dient de elasticiteitsmodulus, $E_{0,mean}$, te worden bepaald met de volgende formule:

$$E_{0,mean} = \frac{\sum E_j n_j}{\sum n_j}$$

In deze formule is E_j de gemiddelde elasticiteitsmodulus van een monster en n_j het aantal proefstukken in monster j . Dit is een formule om de elasticiteitsmodulus te bepalen van een materiaal dat vanuit meerdere monsters is beproefd. De proefstukken in dit onderzoek zijn allen afkomstig uit hetzelfde monster en daarbij valt de term n_j uit bovenstaande formule weg en daarmee is $E_{0,mean}$ gelijk aan de gemiddelde elasticiteitsmodulus.

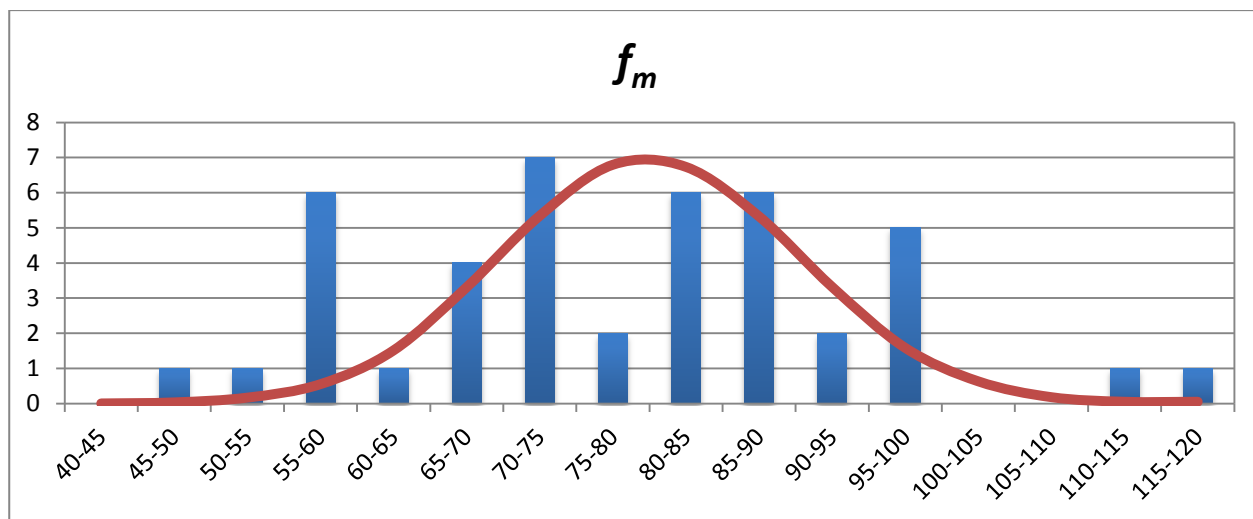
²⁶ <http://green-boo.com/Characteristics.asp>, bezocht: januari 2016

In de beproevingen voor de elasticiteitsmodulus zijn uiteindelijk 31 proefstukken getest. Dit is niet het benodigde minimum van 40 proefstukken zoals gesteld in norm, maar het geeft wel een goede indicatie van het beschikbaar gesteld product. De uitkomst van de gemiddelde waarde kwam uit op:

$$E_{0,mean} = 8959 \text{ N/mm}^2$$

De elasticiteitsmodulus die gegeven is op de website van Green-Boo²⁷ ligt tussen 6500 N/mm^2 en 7300 N/mm^2 . Dit is een afwijking van gemiddeld 23%. Met de waarden van Green-Boo zou de gelamineerd bamboe ingedeeld worden in houtsterkteklasse C14. De uitkomst van de buigproef zou een houtsterkteklasse C18 opleveren. Dit is nog steeds lager dan C24 dat standaard in gelamineerd hout wordt toegepast.

De uitkomsten van de buigsterkte is weergegeven in de grafiek 3.1:



Grafiek 3.1 – Uitkomsten 4-punts buigproef

In de grafiek is met blauwe staven aangegeven hoeveel proefstukken tussen een bepaald buigsterktebereik vallen. Aan de hand hiervan kan een normale verdeling gemaakt worden. Deze is met een rode lijn weergegeven. Aan de hand van de normale verdeling is een 5-percentiel waarde van f_m te bepalen.

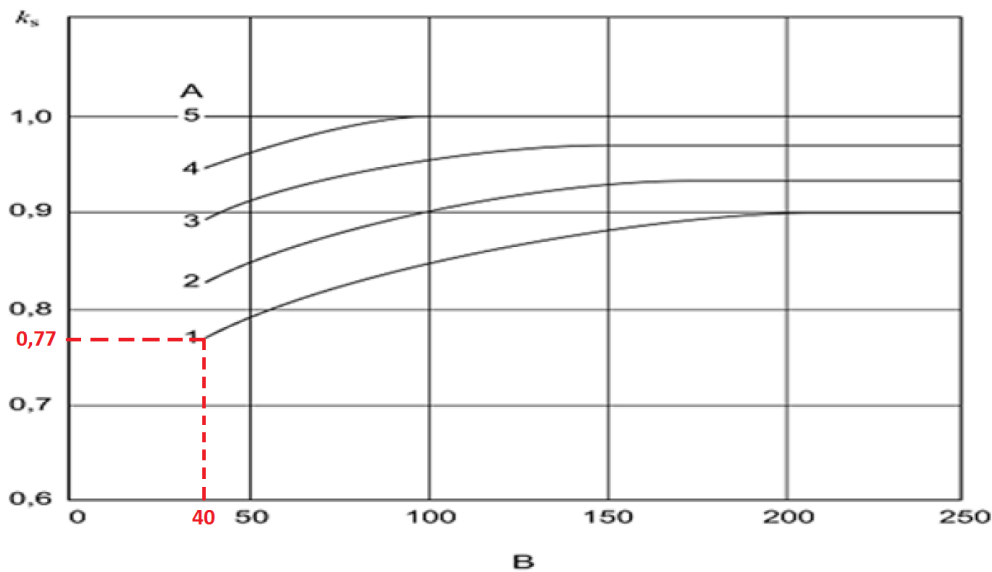
$$f_{0,05} = 55,4 \text{ N/mm}^2$$

²⁷ <http://green-boo.com/Characteristics.asp>, bezocht: januari 2016

De 5-percentielwaarde uit de beproeving dient volgens de NEN-EN 384 als basis voor het bepalen van de karakteristieke buigsterkte $f_{m,k}$.

$$f_{m,k} = f_{0,05} k_s k_v^{28}$$

Hierin is $f_{m,k}$ de karakteristieke buigsterkte, $f_{0,05}$ de 5-percentielwaarde bepaald in de beproeving, k_s is een factor die bepaald wordt uit onderstaande grafiek afkomstig uit NEN-EN 384 en k_v is volgens NEN-EN 384 gelijk aan 1,0.



Grafiek 3.2 – Grafiek t.b.v. bepalen k_s ²⁹

In deze grafiek is k_s uitgezet tegen A, het aantal monsters waarmee de proef is uitgevoerd en B, het aantal proefstukken per monster. Omdat er gebruik gemaakt is van een enkel monster en het minimale aantal proefstukken 40 is, wordt de factor k_s gelijk aan 0,77. De karakteristieke buigsterkte wordt daarmee:

$$f_{m,k} = 55,4 * 0,77 * 1 = 42,6 \text{ N/mm}^2$$

Terwijl de sterkteklasse volgens de elasticiteitsmodulus op C18 zou uitkomen is dit voor de buigsterkte een ander verhaal. Met een karakteristieke treksterkte van 42,6 N/mm² komt er een sterkteklasse C40 uit. Dat is daarmee een houtsterkte klasse die zelden tot nooit toegepast wordt in gelamineerd hout. Als deze waarde vergeleken wordt met de gegeven waarde Green Boo, valt meteen op dat er een groot verschil is. De waarden op de website van Green-Boo liggen tussen 70 N/mm² en 134 N/mm². Dat is een afwijking van gemiddeld 139%. De laagste waarde van 70 N/mm² is al ruim 60% hoger en de bovenwaarde die Green-Boo aangeeft van 134 N/mm² is zelfs drie maal de karakteristieke waarde uit de eerdere sterktetesten.

²⁸ NEN-EN 384

²⁹ NEN-EN 384

Verklaring verschillen

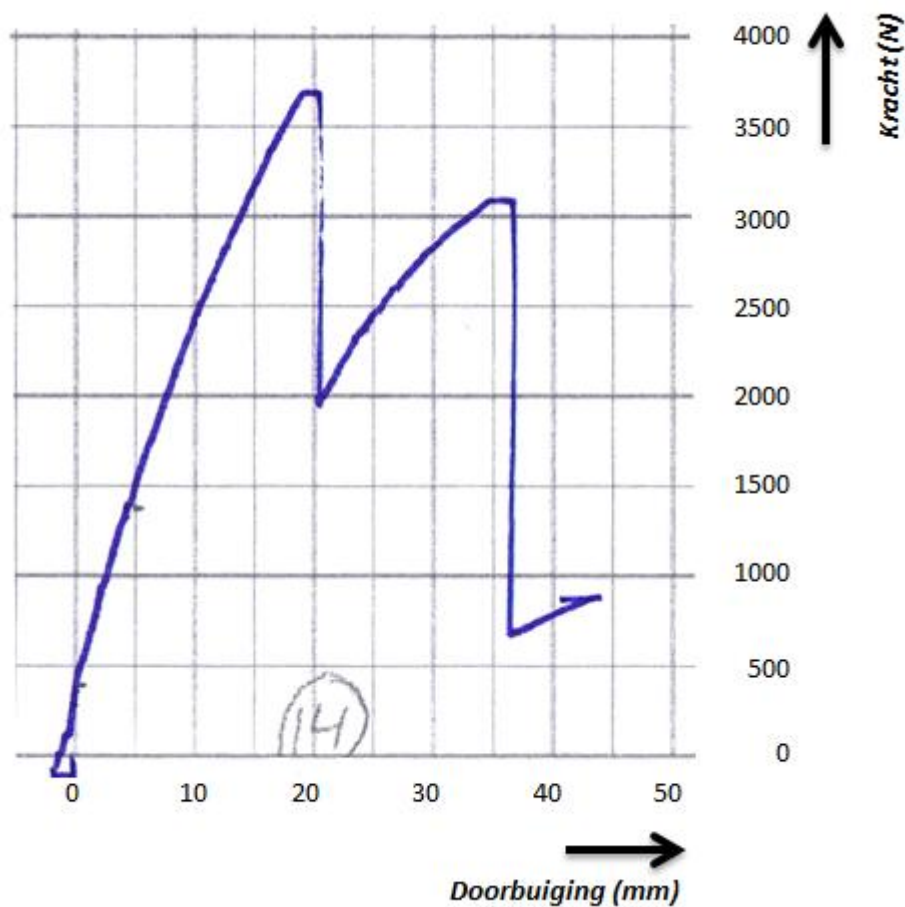
Het verschil zou voor een deel verklaard kunnen worden door de gebruikte proefstukken. In de sterktest is gebruik gemaakt van een proefstuk met een kleine afmeting en de proefstukken waren allemaal 1 bamboestrip breed. Wanneer zich in het proefstuk een knoop of een las bevindt in de onderste 2 lamellen, heeft dat invloed op buigsterkte, omdat deze knopen en lassen de volle breedte van de doorsnede beslaan. Dit geeft daarmee een zwakte in het element over een volledige bamboestrip en daarmee de breedte van het proefstuk. Dit kan leiden tot het vroegtijdig bezwijken van de onderste lamellen, waardoor de maximale buigsterkte van het proefstuk niet behaald is. Wanneer een proefstuk of element opgebouwd is uit meerdere bamboe strips in zowel de breedte als in de hoogte van het element, dragen de naastgelegen bamboe strips mee aan de sterkte van het element. Een las of knoop in de onderste lamellen zullen een minder grote invloed hebben op de sterkte omdat het bezwijken van de bamboestrip wordt tegen gegaan, doordat de strip verlijmd is aan de naastgelegen bamboe strips. De bezwijking van proefstuk 42 is hier een perfect voorbeeld van. Exact in het midden van de onderste lamel bevond zich in proefstuk 42 een knoop. Bij een kracht van 4650 N bezweek de onderste lamel ter plaatse van de knoop. De kracht zakte terug en begon opnieuw op te bouwen tot ook de tweede lamel van onderen bezweek en er uiteindelijk geen kracht meer opgebouwd werd.



Figuur 3.3 – Zijaanzicht en onderaanzicht van proefstuk 42 na bezwijken

Figuur 3.3 zijn foto's genomen van proefstuk 42 na het bezwijken. Op het zijaanzicht is goed te zien dat beiden onderste lamellen bezweken zijn. Op het onderaanzicht is te zien dat in de onderste lamel, ter plaatse van de breuk, de vezels niet netjes recht lopen, maar dat ze elkaar kruisen en in verschillende richting lopen. Dit komt overeen met

een knoop in bamboe, waarbij de vezels als een spaghetti door elkaar lopen. Een ander opvallend verschijnsel aan het bezwijkgedrag van de proefstukken is feit dat de lamellen los van elkaar kunnen bezwijken. Dit zou erop kunnen duiden dat de verlijmingsmethode, die toegepast is om de bamboe strips te verlijmen, niet voldoende sterk is om de spanningen tussen bamboe strips onderling op te vangen. De krachten worden dan niet goed verdeeld over een volledige doorsnede waardoor de strips één voor één bezwijken. De vraag kan gesteld worden of de lijm die is gebruikt wel geschikt is voor dragende constructies. Volgens informatie van Ecobam is de gebruikte lijm thermo verhardend en geschikt voor dragende constructies. De informatie op de website van Green-Boo geeft aan dat de techniek voor het lamineren van de bamboe producten gebeurt onder hete druk³⁰.



Figuur 3.4 – Grafiek met doorbuiging tegenover optredende kracht

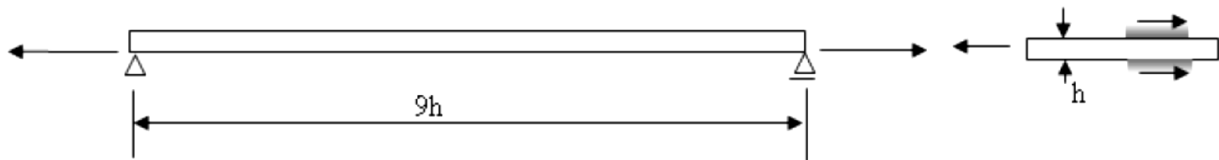
Figuur 3.4 is een scan van de getekende grafiek die bij het beproeven van proefstuk hoort. De horizontale as staat voor de doorbuiging van het proefstuk en de verticale as staat voor de kracht die op het proefstuk wordt uitgeoefend. De schaal van de horizontale is 1:1, 1mm op papier is 1mm doorbuiging van de ligger. Eén maatlijn op papier is 5mm. De schaal van de verticale as is 1:500, 1 maatlijn op papier is 500N aan kracht op het proefstuk. Doordat de punt van de stift niet exact terug op de nullijn was te plaatsen zit er een kleine afwijking in de waarden die af te lezen zijn op de grafiek, maar de krachten zijn tevens van de wijzerplaat met een nauwkeurigheid van 20N af gelezen. Op de grafiek is goed te zien dat kracht opgebouwd wordt tot het punt dat de eerste lamel bezwijkt. De kracht slaat terug naar

³⁰ <http://green-boo.com/Characteristics.asp>, bezocht: januari 2016

$\pm 2000N$. De kracht wordt nu opgevangen door de overgebleven doorsnede van $\pm 32mm$ hoog. De kracht die de resterende doorsnede op kan nemen loopt weer op tot de spanning onderin de resterende doorsnede te hoog wordt en de onderste lamel of lamellen in de resterende doorsnede bezwijken. De kracht valt opnieuw terug. Doordat de bovenzijde van het proefstuk nog onbeschadigd is, zou er opnieuw kracht opgebouwd kunnen worden. Omdat de hoogte van de resterende doorsnede inmiddels dusdanig is afgenomen, is de verplaatsing die optreedt bij het opbouwen van de kracht nu zo groot dat de veiligheidsschakelaar van het proefapparaat wordt ingedrukt, waardoor de machine afslaat.

3.2.3 Trekproef

Voor de trekproef zijn 32 proefstukken getest. Daarbij is alleen de treksterkte in de vezelrichting getest. Dit omdat het testen loodrecht op de vezelrichting een nauwkeurige preparatie van de proefstukken vereist. De daarvoor vereiste expertise was niet aanwezig, zodat deze proeven niet uitgevoerd zijn. De afmeting van de proefstukken zijn 20x20mm met een lengte van 280mm. Hiermee voldeden ze aan de gestelde eisen vanuit de NEN-EN 408.



Figuur 3.5 – Eisen aan proefopstelling trekproef³¹

De proefopstelling voor een trekproef wordt getoond in figuur 3.5. De lengte tussen de grepen van de machine dient 9 maal de grootste zijde van de doorsnede, in dit geval $9 \cdot 20 = 180\text{mm}$. Om een goede grip te hebben zijn de proefstukken met 2 maal 50mm langer genomen zodat de proefstukken goed in de machine vast te klemmen waren. Om het proefstuk te testen voor de elasticiteitsmodulus is het belangrijk dat de kracht die wordt toegepast geen blijvende schade veroorzaakt aan het proefstuk. Om dit te beheersen werd uitgegaan van eenzelfde krachttoename als bij de 4-punts buigproef. Hiervoor moest eerst de maximale opneembare trekkracht bepaald worden. Dit gebeurde door middel van dezelfde test opstelling. De bijbehorende formule om de maximale trekkracht te bepalen is de volgende:

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

Hierin is $f_{t,0}$ de maximale trekspanning evenwijdig aan de vezelrichting, F_{max} de maximale kracht op het proefstuk en A de oppervlakte van de doorsnede van het proefstuk, $b \cdot h$. De breedte en hoogte van elk proefstuk zijn nagemeten met een schuifmaat met een nauwkeurigheid van $0,02\text{mm}$.

³¹ NEN-EN 408+A1

Als de maximale kracht is bepaald kunnen de proefstukken getest worden voor de elasticiteitsmodulus. Dat gebeurt met de volgende formule:

$$E_{t,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)}$$

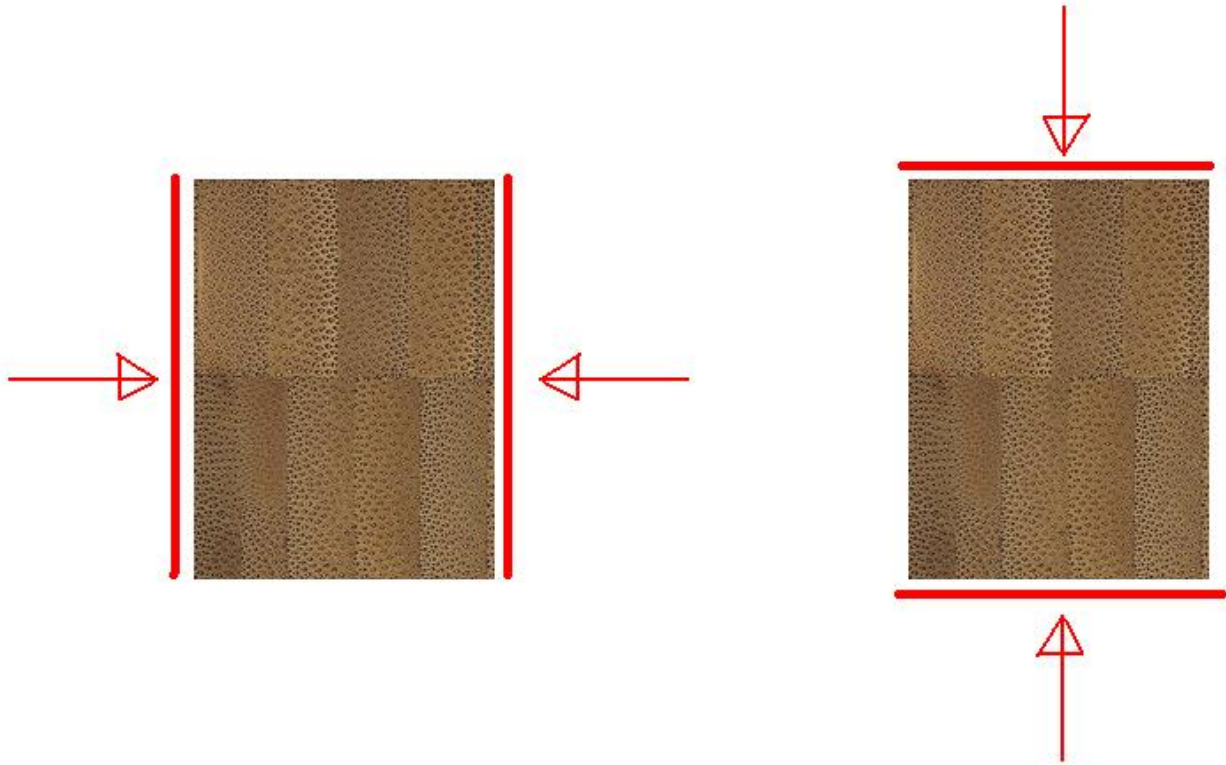
Hierin is $E_{t,0}$ de elasticiteitsmodulus, l_1 is de lengte van een 5 maal de breedte van het proefstuk waarover de vervorming wordt gemeten, $F_2 - F_1$ is de krachttoename, A is de oppervlakte van de doorsnede van het proefstuk en $w_2 - w_1$ is de vervorming ten gevolge van de krachttoename.

Proef elasticiteitsmodulus

De beproevingen voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus op trek is om meerdere redenen niet uitvoerbaar geweest. Voor het bepalen van de verplaatsing over een lengte van 5 maal de breedte van het proefstuk is het essentieel dat dit zeer nauwkeurig gebeurt. De daarvoor benodigde juiste meetapparatuur, om de verplaatsing dusdanig nauwkeurig op te meten, zodat het te vertalen is naar een juiste elasticiteitsmodulus, was niet beschikbaar. Een andere reden waardoor de proeft niet goed uit te voeren was, kwam door de gebruikte proefmachine. Deze veroorzaakt een druk loodrecht op de vezels ter plaatse van de inklemming, die in veel gevallen een deel van de vezels kapot drukte. Hierdoor was de verplaatsing over een lengte van 5 maal de breedte van het proefstuk niet meer relevant, omdat het proefstuk buiten de plek waarover de verplaatsing gemeten wordt een grotere vervorming heeft, die vaak ook niet meer elastisch is.

Treksterkteproeven

De proeven die zijn uitgevoerd hebben alleen op de treksterkte betrekking gehad. Er is vanuit Green-Boo geen karakteristieke waarde van de treksterkte van gelamineerd bamboe bekend. Opvallende is de hoogte van de karakteristieke treksterkte die bekend is van andere onderzoeken of producenten. Waarden³² die gepubliceerd zijn liggen tussen de 80 en 350 N/mm². Wanneer dit een karakteristieke waarde is zou dit betekenen dat gelamineerd bamboe een hogere treksterkte heeft dan staal.

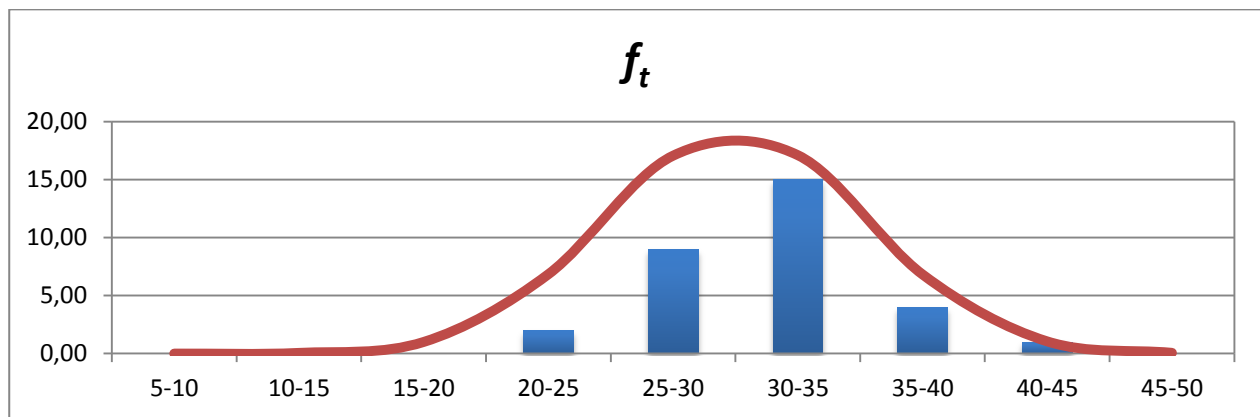


Figuur 3.6 – Verschillende richtingen van inklemmen ten opzicht van bamboestrips tijdens trekproef

Wat meteen opviel is dat de indrukking bij de inklemming tijdens de trekproef sterk afhankelijk was van de richting waarin de bamboestrips geplaatst waren. Wanneer de druk veroorzaakt door de inklemming over de lange zijde van de bamboestrips was uitgeoefend, de linker afbeelding, had dit een groter negatief effect op het proefstuk dan wanneer de druk was uitgeoefend over de korte zijde van bamboestrips, de rechter afbeelding. Doordat er een in de richting waarin het proefstuk plaatselijk op druk loodrecht op de vezel wordt belast, in de rechter situatie een gelijkere verdeling is van vezels, zal in die situatie de gevolgen van de druk ook minder zijn. Dit was redelijk gelijk aan trekproeven die op hout gedaan worden. Alleen doordat de vezelverdeling in een houten doorsnede niet zo verschillend is over de doorsnede van het proefstuk, zoals dat bij bamboe wel is, heeft de indrukking een minder groot negatief effect op de uitkomst van de trekproef.

³² Eratodi, *The effect of specific gravity on embedding strength of glued-laminated bamboo*, 2012

Zoals voor de buigsterkte is voor de treksterkte ook een grafiek met normale verdeling opgesteld. Zie tabel 3.3



Grafiek 3.3 – Uitkomst treksterkte

Wederom is met blauwe staven het aantal proefstukken aangegeven dat binnen een bepaald treksterktebereik valt. De rode lijn is de normale verdeling. Normale waarden³³ voor de treksterkte van naaldhout zijn 80 tot 100 N/mm^2 . De treksterkte van hout is hoger dan de druksterkte van hout. Dit zou in theorie ook voor bamboe gelden. De uitkomst van de trekproef lag een stuk lager dan de verwachte waarden aan de hand van de gegevens van houtproeven. De 5-percentiel waarde van de treksterkte van de bamboeproef was:

$$f_{0,05} = 25,3 \text{ N/mm}^2$$

Als we de 5-percentiel op dezelfde manier toepassen voor het bepalen van de karakteristieke treksterkte als bij de 4-puntsbuigproef krijgen we de volgende karakteristieke treksterkte:

$$f_{t,0,k} = 19,5 \text{ N/mm}^2$$

³³ <http://houtdatabase.nl>, bezocht: januari 2016

Sterkteklasse

Met deze karakteristieke treksterkte zou gelamineerd bamboe ingedeeld worden in sterkteklasse GL28c/GL30c³⁴. Dit is daarmee een gelijkwaardige treksterkte aan gelamineerd hout. Voor zaaghout komt het in sterkteklasse C30³⁵. Deze karakteristieke treksterkte komt echter nog niet in de buurt van de gepubliceerde waarden³⁶ van minimaal 80N/mm². Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het feit dat de proefstukken ter plaatse van de inklemming dusdanig ingedrukt worden, dat de vezels lokaal kapot gedrukt worden en feitelijk wordt daarmee de doorsnede van het proefstuk dat de trekkracht op dient te nemen verkleind. Een oplossing voor dit probleem zou kunnen zijn om de proefstukken tussen de inklemmingen te verjongen tot een kleinere doorsnede. Hierdoor zou de maximale kracht de kleinere doorsnede eerder doen bezwijken dan ter plaatse van de inklemming. Dit zou een eerlijker waarde van de treksterkte van het proefstuk opleveren.



Figuur 3.7 – Alle op trek geteste proefstukken

Op figuur 3.7 staan alle proefstukken afgebeeld die zijn getest op trek. Opvallend is dat alle proefstukken bezwiken zijn binnen 1 cm vanaf de inklemming. In sommige gevallen is een gedeelte van de vezels op een andere plek in het proefstuk bezwiken. Dit is in die gevallen vaak ter plaatse van een knoop of las geweest. Proefstuk T30 is zowel in de vezels bezwiken als op de lijm. Dit is opvallend aangezien er parallel aan de vezels wordt getrokken. Maar er is duidelijk te zien dat ter plaatse van beide inklemmingen de helft van de doorsnede is bezwiken en op de lijmnaad is het proefstuk vervolgens over de lengte doorgescheurd.



Figuur 3.8 – Proefstuk T30 na bezwijken

³⁴ NEN-EN 14080, 2013

³⁵ NEN-EN 338, 2009

³⁶ Eratodi, *The effect of specific gravity on embedding strength of glued-laminated bamboo*, 2012

Op figuur 3.8 is proefstuk T30 te zien. Waar bij de andere proefstukken de doorsnede volledig bezweek op trek in de vezels, geldt dat niet voor proefstuk T30. Dit betekent dat de verlijming die toegepast is onvoldoende sterk was om een afschuiving parallel aan de vezelrichting over te kunnen brengen. Een proefstuk zou in principe nooit mogen bezwijken op de lijm. Wanneer dit wel het geval is betekent dit dat niet de maximale sterkte van het basismateriaal is bereikt, maar de maximale sterkte van de lijmverbinding. Bij nader bestuderen van het proefstuk bleek dat de breuk in de lengte richting van de doorsnede over ongeveer 9cm volledig vlak is. Dit zou erop kunnen duiden het niet noodzakelijkerwijs de lijm is waarop het proefstuk is bezweken, maar dat het proefstuk onvoldoende goed verlijmd was. Op figuur 3.9 is te zien dat de breuk heel schoon is.



Figuur 3.9 – De breukvlakken van proefstuk T30

De treksterkte zou ook bepaald kunnen worden aan de hand van de buigsterkte. In NEN-EN 384 staat in hoofdstuk 6 beschreven dat aan de hand van de buigsterkte, elasticiteitsmodulus en dichtheid van een houtsoort, alle overige karakteristieke waarden bepaald kunnen worden.

Zo is de treksterkte aan de hand van de buigsterkte als volgt te berekenen:

$$f_{t,0,k} = 0,6 * f_{m,k}$$

Wat een karakteristieke treksterkte geeft van:

$$f_{t,0,k} = 0,6 * 42,6 = 25,6 \text{ N/mm}^2$$

Dit is een meer realistische waarde dan de uitkomst van de trekproef, omdat bij de trekproef duidelijk invloed is geweest van de inklemming. Toch is dit nog steeds niet een waarde die in de buurt komt van waarden die gepubliceerd zijn. Dit komt doordat de treksterkte nu bepaald is aan de hand van een buigproef. Hierbij wordt de bamboe niet puur op trek beproefd, maar eigenlijk een combinatie van druk in de bovenzijde van het proefstuk en trek in de onderzijde van het proefstuk.

3.2.4 Drukproeven

Voor de drukproef zijn 27 proefstukken gebruikt om te testen. Ook voor de drukproef gold dat de druksterkte alleen bepaald kon worden voor druk evenwijdig aan de vezelrichting. In dit geval was de reden dat proefstukken een te specifieke eis hebben om te voldoen aan drukproeven loodrecht op de vezelrichting. Er was teveel materiaal nodig om daar een goede proef voor uit te voeren. De afmetingen van de proefstukken waren 45x45mm met een lengte van 270mm. De lengte van de proefstukken dient minstens 6 maal de kleinste zijde van de doorsnede van het proefstuk te zijn. Dit is $45 \times 6 = 270\text{mm}$. Hiermee voldeden de proefstukken aan de gestelde eisen in de NEN-EN 408.

Ook hier gold weer dat eerst de maximale kracht dient te worden bepaald. Dit gebeurde aan de hand van de volgende formule:

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A}$$

Hierin is $f_{c,0}$ de maximale drukspanning evenwijdig aan de vezelrichting, F_{max} de maximale kracht en A de oppervlakte van de doorsnede van het proefstuk, $b \cdot h$. De breedte en hoogte van elk proefstuk zijn nagemeten met een schuifmaat met een nauwkeurigheid van $0,02\text{mm}$. Als de maximale kracht is bepaald kunnen de proefstukken getest worden voor de elasticiteitsmodulus. Dat gebeurt met de volgende formule:

$$E_{c,0} = \frac{l_1(F_2 - F_1)}{A(w_2 - w_1)}$$

Hierin is $E_{c,0}$ de elasticiteitsmodulus, l_1 is de lengte van een 4 maal de breedte van het proefstuk waarover de vervorming wordt gemeten, $F_2 - F_1$ is de krachttoename, A is de oppervlakte van de doorsnede van het proefstuk en $w_2 - w_1$ is de vervorming ten gevolge van de krachttoename.

De waarden³⁷ voor de karakteristieke druksterkte van gelamineerd bamboe die gepubliceerd zijn liggen tussen de 70 en 93 N/mm^2 . Voor het bepalen van de druksterkte zijn 27 proefstukken getest. De machine waar ook de trekproef en de 4-punts buigproef mee uitgevoerd zijn, was onvoldoende krachtig om de proefstukken met een doorsnede van $45 \times 45\text{mm}$ op druk te beproeven. De drukproeven zijn daarom met een ander testapparaat gedaan. Dit apparaat heeft geen grafische uitvoer, maar enkel een wijzerplaat waarop de krachten af te lezen zijn. De waarden van de krachten zijn uitgedrukt in tonnen en is tot $0,1 \text{ T}$ nauwkeurig af te lezen. Dit geeft een minder nauwkeurige uitslag dan het apparaat waarop de trek- en 4-puntsbuigproef zijn uitgevoerd.

³⁷ Eratodi, The effect of specific gravity on embedding strength of glued-laminated bamboo, 2012

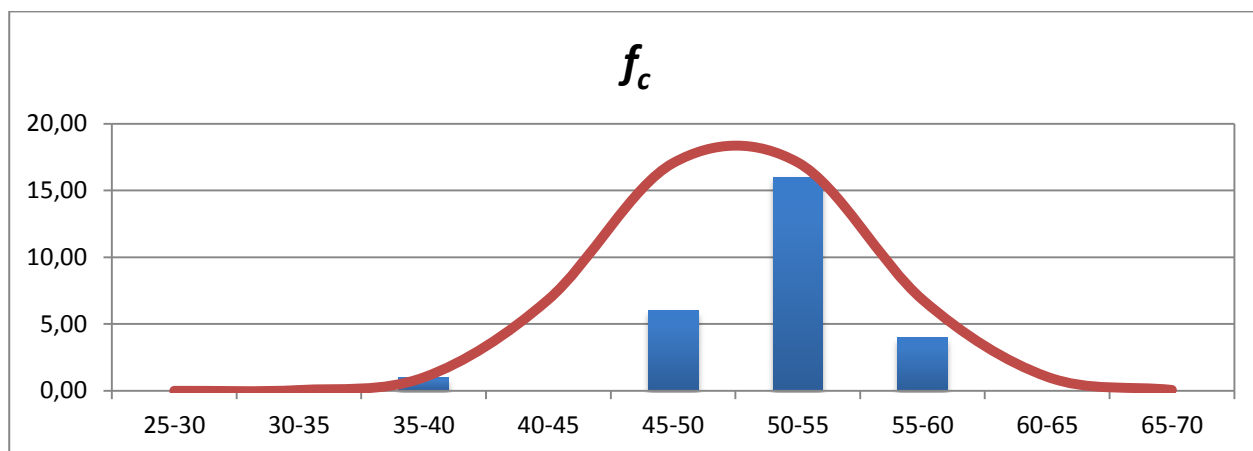
Ondanks dat de proefstukken voor de drukproef bij een professionele zagerij op maat waren gezaagd, zijn de kopse kanten van de proefstukken niet 100% parallel. Dit probleem werd door de testapparatuur opgelost, doordat de drukplaten waartussen de proefstukken beproefd worden scharnierend zijn. Daardoor sluiten de drukvlakken goed aan op de kopse zijden van de proefstukken.

Voor het bepalen van de F_{max} zijn proefstukken D1 t/m D7 gebruikt. Dit omdat er aanzienlijk minder proefstukken beschikbaar waren voor de drukproef als bij de 4-punts buigproef. Hierdoor zijn vervolgens nog 20 proefstukken over om te beproeven voor de elasticiteitsmodulus en de druksterkte.

$$E_{c,0} = 1637 \text{ N/mm}^2$$

Deze waarde is aanzienlijk lager dan wat er uit de 4-punts buigproef kwam. Bij constructief toegepast hout, klasse C24 en hoger, is voor de elasticiteitsmodulus³⁸ 11.000 N/mm^2 . Dat is bijna 7 keer hoger dan de uitkomst van de drukproef op bamboe. Reden voor deze afwijking zou kunnen zijn dat de kracht die uitgeoefend wordt tijdens de drukproef niet nauwkeurig genoeg is af te lezen. Toch zouden er dan grotere verschillen in de uitkomsten van de proefstukken moeten zitten. Nu liggen de waarden van alle proefstukken wel rond de 1637 N/mm^2 .

Van de resultaten van de druksterkte is weer een grafisch overzicht gemaakt, zie grafiek 3.4:



Grafiek 3.4 – Uitkomsten drukproef

Ook in deze grafiek zijn de blauwe staven het aantal proefstukken dat binnen een bepaald druksterktebereik valt. Met wederom de rode lijn als normale verdeling. De bijbehorende 5-percentiel waarde van de druksterkte is:

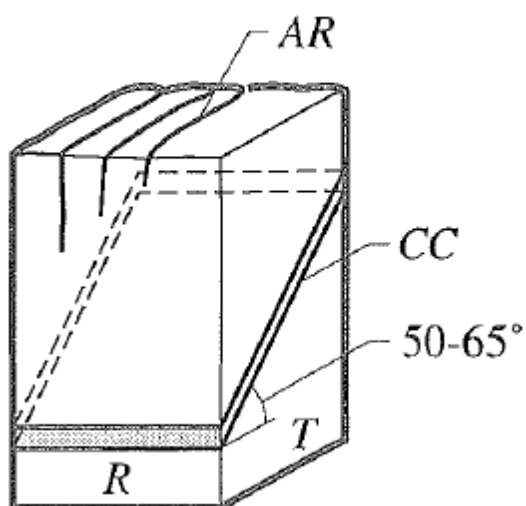
$$f_{0,05} = 46,6 \text{ N/mm}^2$$

³⁸ NEN-EN 338, 2009

Met de daaruit volgende karakteristieke druksterkte:

$$f_{c,0,k} = 35,9 \text{ N/mm}^2$$

Met deze karakteristieke druksterkte levert gelamineerd bamboe een hogere druksterkte dan de sterkteklassen voor zowel gezaagd hout als gelamineerd hout. De hoogste karakteristieke drukste van gelamineerd hout is GL32h met 32 N/mm^2 en voor gezaagd hout is het D70³⁹ met 34 N/mm^2 . Deze waarde komt redelijk in de buurt van waarden die gepubliceerd zijn, maar is nog steeds aan de lage kant. Bij het proeven van de proefstukken op druk is een opmerkelijk feit te constateren. Het bezwijkgedrag van de bamboe proefstukken komt in geen van de gevallen overeen met het bezwijkgedrag van hout. Wanneer hout op druk wordt beproefd ontstaat er een schuine breuklijn onder een hoek van ongeveer 50 tot 65° haaks op vezelrichting, zoals te zien in figuur 3.10. Dit is een afbeelding voor hout. Omdat de manier waarop zowel hout als bamboe aan hun sterkte komen, redelijk gelijk is aan elkaar kun je een gelijkwaardig bezwijkgedrag van de bamboe verwachten. Dit is bij de beproeving echter in geen van de gevallen gebeurd.



Figuur 3.10 – Bezwijkgedrag van hout onder druk⁴⁰

Bij 22 van de 27 proefstukken was duidelijk te constateren dat de proefstukken zijn bezweken op de verlijming tussen de lamellen. Bij deze proefstukken was tijdens de beproeving duidelijk te zien dat bij het oplopen van de drukkracht, één of meerdere lamellen onder de drukkracht naar buiten gedrukt werden, waarna de proefstukken over een bepaalde lengte van het proefstuk delamineerden.

³⁹ NEN-EN 338, 2009

⁴⁰ Blass, *Timber Engineering STEP 1*, Salland De Lange, Deventer, 1995



Figuur 3.11 – Proefstuk D2(boven) en proefstuk D23(onder) na bezwijken

Figuur 3.11 laat duidelijk zien dat de lamellen uit elkaar gedrukt zijn bij proefstuk D2. En in proefstuk D23 is ook duidelijk het effect van het uit elkaar drukken van de lamellen te zien. Het feit dat de proefstukken bijna allemaal bezwijken op de lijm geeft aan dat de lijm de zwakte is in de elementen. De bamboe zou mogelijk een hogere druksterkte hebben wanneer er een beter lijm wordt toegepast.

Zoals bij de treksterkte is ook de druksterkte te bepalen vanuit de buigsterkte:

$$f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0,45}$$

Wat een karakteristieke druksterkte geeft van:

$$f_{c,0,k} = 5 * 42,6^{0,45} = 27,1 \text{ N/mm}^2$$

Dit geeft een lagere druksterkte dan uit de drukproef is gebleken. Dit bevestigt dat de druk- en treksterkte, wanneer bepaald uit de buigsterkte, wel een indicatie geeft van de trek- en druksterkte bij buiging, maar niet bij zuivere trek- of drukbelasting.

3.3 VERGELIJKING MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN

De uitkomsten van de materiaalproeven geven een indicatie van de sterkte-eigenschappen van gelamineerd bamboe dat geproduceerd wordt van Moso bamboe. Dit is de meest toegepaste bamboe, zowel in China, maar ook in het Europa. Maar interessant is het om de bevindingen te vergelijken met de uitkomsten van anderen en ook de karakteristieke waarden die op internet en bij producenten gepubliceerd zijn.

3.3.1 Onderzoek Vos, TU Delft

Vos⁴¹ heeft tijdens zijn studie aan de TU Delft ook 4-puntsbuigproeven gedaan op gelamineerd Moso bamboe. De uitkomsten van zijn proeven zijn redelijk gelijk aan de uitkomsten van het onderhavige onderzoek. Een belangrijk verschil tussen de proeven van Vos en de proeven van dit onderzoek is de richting van de bamboestrips. Bij de proeven van Vos zijn de strips verticaal geplaatst, waardoor de vezelbundelverdeling over de hoogte van het proefstuk gelijk is. Bij de proefstukken in dit onderzoek zijn de bamboestrips horizontaal geplaatst. Hierdoor is de vezelbundelverdeling over de hoogte verschillend. Dit is voor ieder proefstuk genoteerd, maar omdat de proefstukken gezaagd zijn uit een plank die normaliter niet voor dragende constructie wordt gebruikt, is de richting waarin de bamboe strips geplaatst zijn in de proefstukken verschillend over de doorsnede van de proefstukken.



Figuur 3.12 – Horizontale plaatsing van bamboestrips bij 4-punts buigproef in dit onderzoek

Op de foto is te zien dat de vezeldichtheid bij de bovenste 3 lamellen aan de onderzijde hoger is dan aan de bovenzijde. De vezeldichtheid bij de 4^e lamel juist aan de bovenzijde hoger is dan aan de onderzijde en dat bij de 5^e lamel het weer zo is als bij de eerste 3 lamellen. Dit zal voor kleiner proefstukken van invloed zijn op de uitkomsten, zeker omdat de proefstukken in dit geval slechts bamboe strip breed zijn. Op het moment dat bamboebalken grotere afmetingen krijgen, zal de invloed van de verdeling van de vezeldichtheid in de bamboe strips verminderen en uiteindelijk verwaarloosbaar zijn. Dit zou bij de proeven van Vos ook al naar voren moeten komen. Bij zijn proefstukken is het bezwijken in alle gevallen opgetreden tussen de twee puntlasten. Dit geeft aan dat de proefstukken allemaal puur op buiging bezwaken zijn. Ook kan bij de scheurpatronen geconstateerd worden dat er in geen geval dat de scheuren doorlopen tot bij de oplegging of zelfs het hele proefstuk in stukken opbreekt⁴². Dit is bij

⁴¹ Vos, *Una reunión educativa con el bambu*, 2015

⁴² Vos, *Una reunión educativa con el bambu*, 2015

enkele van de proefstukken in het onderhavige onderzoek wel het geval. Dit komt omdat er in dit geval sprake was van een enkele bamboestrip. Het samenwerken van meerdere strips over de breedte zorgen voor een lokale scheurvorming in de proefstukken, doordat de krachten over meerdere strips worden gedistribueerd.

Vos komt uiteindelijk op de volgende waarden⁴³ uit:

$$E_{0,mean} = 9567 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{0,05} = 49,5 \text{ N/mm}^2$$

De elasticiteitsmodulus komt daarmee op een afwijking van ongeveer 6,5% ten opzichte van de resultaten van dit onderzoek. De karakteristieke waarde die Vos geeft in zijn rapport is waarschijnlijk de 5-percentiel waarde van de testresultaten. Om deze om te zetten naar de karakteristieke buigsterkte dient volgens NEN-EN 384 de 5-percentiel waarde nog te worden vermenigvuldigd met de factoren k_s en k_v , zoals dit in dit onderzoek bij de uitkomsten van de 4-punts buigproef is gedaan. Dan komt er een karakteristieke buigsterkte uit van:

$$f_{m,k} = 49,5 * 0,77 * 1 = 38,1 \text{ N/mm}^2$$

Deze waarde verschilt 11% met de uitkomst van de 4-punts buigproef in dit onderzoek. Dit is opmerkelijk aangezien Vos de proefstukken heeft beproefd met de bamboe strips verticaal geplaatst. Hierdoor zouden er geen negatieve gevolgen moeten zijn van de vezelverdeling in de bamboe strips, zoals bij de onderhavige proeven wel het geval zou kunnen zijn. Een keerzijde is dat het ook geen voordelige gevolgen zou kunnen hebben als in het huidige onderzoek de bamboe strips zo geplaatst zouden zijn dat de vezelverdeling onderin de onderste lamellen van het proefstuk hoger was dan bovenin de onderste lamellen van het proefstuk.

⁴³ Vos, *Una reunión educativa con el bambu*, 2015

3.3.2 Onderzoek De Vos, Hogeschool Van Hall Larenstein

Het onderzoek van De Vos⁴⁴ is een zeer interessant onderzoek voor de sterkte van gelamineerd bamboe. Hij heeft onderzoek gedaan naar de basismaterialen voor gelamineerd bamboe, door de enkele strips te beproeven. Ook interessant is dat hij de twee grote bamboesoorten Guadua en Moso met elkaar heeft kunnen vergelijken. Hij heeft van geleverde bamboestammen, van zowel Moso als Guadua, zelf strips geproduceerd en deze vervolgens aan verschillende tests onderworpen. De resultaten zijn de mechanische eigenschappen van de basismaterialen Moso bamboe en Guadua bamboe. Om mee te nemen wat de effecten zijn van de knopen op de eigenschappen van de bamboe heeft hij ook de tests opgesplitst in tests met proefstukken die knopen bevatten en proefstukken die geen knopen bevatten. Voor het bepalen van de elasticiteitsmodulus heeft De Vos ook een 4-punts buigproef uitgevoerd⁴⁵.

	Moso	Guadua	
$E_{0,mean}$	8562	13249	N/mm^2
$f_{0,05}$	88,4	85,3	N/mm^2

Deze waarden geven direct een duidelijk verschil tussen Moso en Guadua weer. De elasticiteitsmodulus van Moso komt overeen met de testresultaten het huidige onderzoek. Maar de elasticiteitsmodulus van Guadua ligt een stuk hoger. Een groot verschil met de testen die De Vos is dat hij losse strips test. Er zijn geen verzwakkingen door lassen, maar puur de eigenschappen van het basismateriaal. De buigsterkte van de individuele strips ligt ook duidelijk een stuk hoger dan uit de proeven uit dit onderzoek of uit de proeven van Vos is gekomen. Dit is nog wel de 5-percentiel waarde van de bamboe en als deze omgezet wordt naar de karakteristieke waarde komt daar het volgende resultaat uit:

$$f_{m,k} = 88,4 * 0,77 * 1 = 68,1 \text{ N/mm}^2 \text{ (Moso)}$$

$$f_{m,k} = 85,3 * 0,77 * 1 = 65,7 \text{ N/mm}^2 \text{ (Guadua)}$$

⁴⁴ De Vos, Bamboo material properties & market perspectives, 2010

⁴⁵ De Vos, Bamboo material properties & market perspectives, 2010

Verlijmbaarheid

Een ander deel van zijn onderzoek is van groot belang voor het toepassen van gelamineerd bamboe. De Vos heeft in zijn onderzoek ook de verlijmbaarheid van beide bamboesoorten getest. En daarbij is gekeken naar welke lijmsorten het meest geschikt zijn om bamboe te verlijmen. Voor het verlijmen van gelamineerd hout gebruikt Korlam een MUF-lijm. Dit is een Melamine Ureum Formaldehyde lijm. UF-lijm wordt gebruikt voor het verlijmen van bijvoorbeeld triplex- en vezelplaten en is niet waterbestendig. De melamine zorgt er voor dat de lijm beter bestand is tegen vocht en warmte. Niet onbelangrijk is dat deze lijm gecertificeerd is voor het verlijmen van elementen met een dragende toepassing. Bij Kaufmann, een houtleverancier gevestigd in Duitsland en Oostenrijk, wordt MF-lijm, melamineformaldehyde lijm, gebruikt voor het verlijmen van gelamineerde elementen. Zowel MF- als MUF-lijmen zijn toepasbaar in onbeschut buitenklimaat.

De lijmen die De Vos heeft getest zijn PU-lijm, PVAC-lijm en EPI-lijm. De PU-lijm kwam als slechtste uit de test. De PVAC- en de EPI-lijm waren voor Guadua bamboe aanzienlijk beter; voor Moso bamboe bleek uit de test dat alleen de EPI-lijm een voldoende binding had met de bamboe. Hier moet wel de kanttekening geplaatst worden dat er voor PVAC-lijm geen gecertificeerde lijm bestaat voor het toepassen in dragende constructies. Uit het onderzoek van De Vos bleek daarmee dat voor zover bekend een EPI-lijm het meest geschikt is voor het verlijmen van bamboe voor constructieve doeleinden.

3.3.3 Leverancier Green-Boo

De karakteristieke waarden die op de website van de fabrikant van de bamboe terug te vinden zijn, komen niet helemaal overeen met de tests die in het onderhavige onderzoek zijn uitgevoerd. De waarden die zijn gepubliceerd zijn de buigsterkte en de elasticiteitsmodulus. Uit de testresultaten van dit onderzoek bleek dat de buigsterkte lager ligt dan de buigsterkte die gepubliceerd is. En de elasticiteitsmodulus is hoger dan de gepubliceerde waarden. Omdat niet bekend is op welke manier de gepubliceerde waarden verkregen zijn is het lastig om te bepalen waar het verschil in waarden vandaan komt.

Bending strength	≥ 70 Mpa	134 Mpa
Modulus of elasticity in bending	$\geq 6.5 \times 10^3$ Mpa	7.3×10^3 MPa

Figuur 3.13 – Gepubliceerde waarden Green-Boo⁴⁶

Figuur 3.13 laat een afdruk zien van de pagina van Green-Boo met daarop de karakteristieke waarden voor de buigsterkte en de elasticiteitsmodulus. Opvallend is dat er voor beide onderdelen twee waarden worden gegeven. Er bestaat duidelijk geen zekerheid wat de werkelijke buigsterkte of elasticiteitsmodulus is of ze willen deze niet openbaar maken.

3.3.4 Leverancier Lamboo

Lamboo is duidelijk in de publicatie van de karakteristieke waarden⁴⁷ van hun producten. Op de website van Lamboo zijn ook veel foto's beschikbaar van projecten die al uitgevoerd zijn in gelamineerd bamboe. Er staat ook bij elke karakteristieke waarde volgens welke norm en testmethode de waarde is verkregen. De producten zijn gecertificeerd door ASTM. Dit is een non-profit organisatie die in meer dan 140 landen meer dan 12.000 normen heeft ontwikkeld. De waarden die Lamboo heeft gepubliceerd:

$f_{c,0,k}$	93 N/mm^2
$f_{c,90,k}$	21 N/mm^2
$f_{t,0,k}$	148 N/mm^2
$f_{t,90,k}$	3,7 N/mm^2
$f_{m,k}$	88 N/mm^2
$f_{v,k}$	20 N/mm^2
$E_{0,mean}$	26.000 N/mm^2
ρ_m	690 kg/m^3

Van deze waarden is vooral de elasticiteitsmodulus een opvallende waarde. Waar de Moso bamboe vaak een waarde rond de $9000 N/mm^2$ laat zien, komt de gelamineerde bamboe van Lamboo op $26.000 N/mm^2$. De bamboe die Lamboo gebruikt voor het produceren van gelamineerd bamboe is Guadua. Uit het onderzoek van De Vos is al gebleken dat Guadua een hogere elasticiteitsmodulus heeft dan Moso. Wanneer de Guadua verlijmd wordt zal er hoogwaardiger product ontstaan wat de hogere elasticiteitsmodulus kan verklaren.

⁴⁶ <http://www.green-boo.com>, januari 2016

⁴⁷ Lamboo, *Metric mechanical properties*, 2013

3.4 CONCLUSIES MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN

Lastig testen

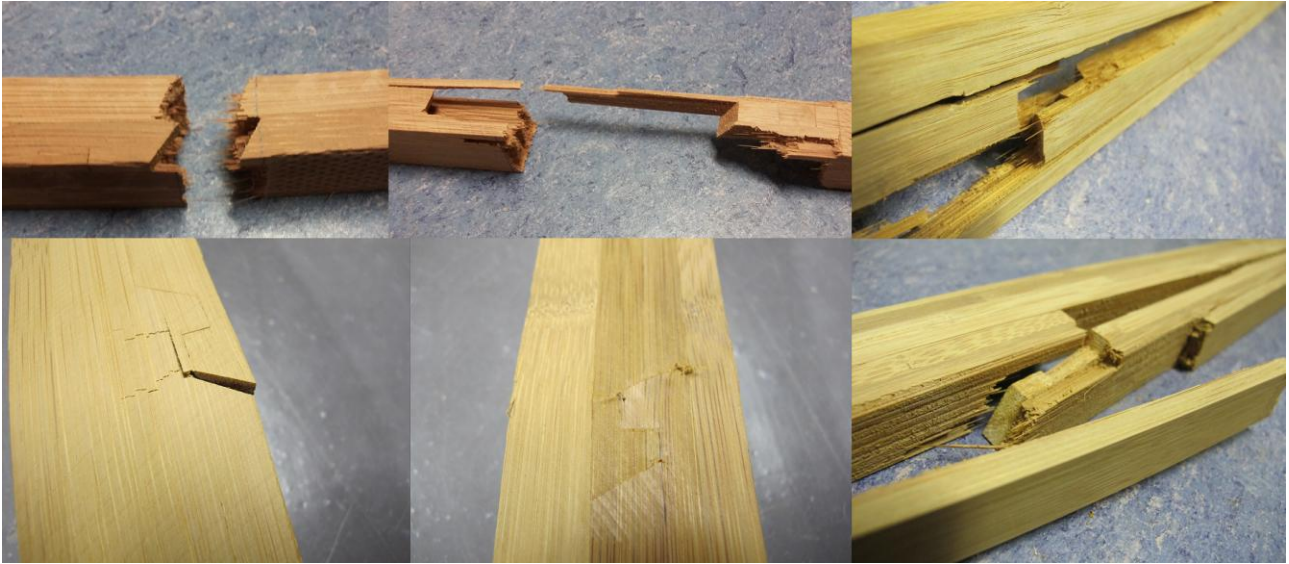
De interesse naar het toepassen van gelamineerd bamboe neemt toe. Er zijn meerdere onderzoeken gedaan naar de mechanische eigenschappen van gelamineerd bamboe. Het lastige van deze onderzoeken is dat de producten zoals ze getest zijn, kleinere proefstukken die niet als dragend element geproduceerd zijn, niet op die manier worden toegepast. Voor de sterktest van Vos is materiaal geleverd dat hij vervolgens zelf op maat heeft moeten maken voor de proeven. Ook het materiaal dat hij van Lamboo geleverd heeft gekregen moest zelf op maat gemaakt worden en was niet van constructieve kwaliteit, maar van interieurkwaliteit.

Guadua bamboe

Al met al geven de resultaten van de sterkte tests wel een indicatie van wat de mechanische eigenschappen van gelamineerd bamboe zouden zijn. Het onderzoek van De Vos heeft duidelijk gemaakt dat van de twee voor de hand liggende bamboesoorten Moso en Guadua, de Guadua bamboe een hogere potentie heeft om toegepast te worden als constructiemateriaal. Belangrijk voor de ontwikkeling van gelamineerd bamboe als productiemateriaal is dat er vanuit de producenten meer naar buiten wordt getreden, zeker als het gaat over de mechanische eigenschappen van de producten. Lamboo loopt voorop met de publicatie van karakteristieke waarden. Maar de leveranciers van Moso producten lijken angstig om teveel informatie naar buiten te brengen.

Verlijming

Als gekeken wordt naar de uitkomsten van de beproevingen in het huidige onderzoek, is er een aantal aspecten van het proefmateriaal die opvallen. Qua afwerking is het product zelf van hoge kwaliteit. De lassen en verlijming die zijn toegepast, maken het een product met een hoge kwaliteit die voor gelamineerd hout gelijk zou kunnen zijn aan zichtkwaliteit. Waar wel vraagtekens bij te zetten zijn, is de methode die is gebruikt om de lamellen te verlijmen. De verlijming van de bamboestrips onderling is, op een kleine uitzondering na, van hoge kwaliteit, maar de verlijming van de lamellen is vooral bij de drukproef erg zwak gebleken. Ook de lassen die worden toegepast om de bamboestrips te verlengen vormen een zwakke plek in het product.



Figuur 3.14 – Proefstukken van alle proeven bezweken op een las

In figuur 3.14 zijn proefstukken afgebeeld van alle uitgevoerde proeven. Bij alle proeven is een deel van de proefstukken bezweken op de las. Bij de 4-punts buigproef is dit het meest voorkomende bezwijkgedrag. Bij het lassen van het materiaal om langere lengtes te kunnen produceren is nog veel winst te behalen. Wanneer de schuine las vervangen zou kunnen worden door bijvoorbeeld een vingerlas, zou de sterkte van het materiaal aanzienlijk toenemen.

4 KOSTEN

4.1 INLEIDING

Om de verschillen tussen een bamboestructuur en een houtconstructie inzichtelijk te maken, zal er gekeken moeten worden naar de bouwmethoden. Zoals eerder (in paragraaf 3.1) beschreven wordt gelamineerd bamboe bij het toepassen als dragende constructie meegenomen in de Eurocode 5. Dit betekent dat de elementen voor zowel gelamineerd bamboe en gelamineerd hout aan dezelfde eisen dienen te voldoen. De bouwmethoden zal voor zowel gelamineerd hout als gelamineerd bamboe hetzelfde zijn. De verschillen voor de kosten zullen niet voortkomen uit een verschil in bouwmethode. Wat wel een verschil met zich meebrengt is de hoeveelheid materiaal die nodig is om een bepaalde constructie op zowel sterkte als stabiliteit aan de vigerende norm te laten voldoen. De uitkomst van de casus is daarmee ook van belang voor de conclusie die getrokken kan worden over een uiteindelijk kostenverschil.

4.2 FINANCIËLE KOSTEN

Doordat de pasbewerkingen voor zowel hout als bamboe hetzelfde zullen zijn, is het verschil in kosten terug te brengen naar het verschil in een materiaalprij. Er zou een eenvoudige vergelijking gemaakt kunnen worden tussen de twee materialen aan de hand van een m³-prijs. Dat zou normaliter een eenvoudige vergelijking zijn. Maar omdat hout ten behoeve van gelamineerde constructies een product is dat in Europa voorhanden is en bamboe niet, is het minder eenvoudig. Het is mogelijk om bij een leverancier als Moso of Ecobam gelamineerde bamboe elementen op maat te bestellen. Deze elementen dienen dan vanuit China naar Nederland vervoerd te worden. Dit gebeurt door middel van zeecontainers. Daarmee is al een eerste belemmering vermeld. Een zeecontainer heeft een maximale grootte. Dat betekent dat de inhoud gebonden is aan de lengte van de zeecontainer en daarmee hebben de elementen die getransporteerd worden een maximale afmeting. De grootste lengte voor een element zou daarom circa 12 meter bedragen. Dit is een aanzienlijke lengte en zou voor menig project voldoende zijn. Maar een ander nadeel van bestellen van maatwerk is dat er een variatie in afmetingen zal bestaan voor ieder project. Tenzij de elementen van een enkel project of van meerdere projecten gecombineerd bij benadering een zeecontainer volledig kunnen vullen is dit financieel geen goede optie. In veel gevallen zal de container niet gevuld raken, of met geluk kan de leverancier de ruimte benutten met producten voor eigen verkoop. De transportkosten zijn momenteel een groot aandeel van de prijs van gelamineerde bamboeproducten. Door slim om te gaan met transport en de beschikbare ruimte van containers tijdens transport optimaal te gebruiken, zou er aanzienlijk bespaard kunnen worden op de kosten van het eindproduct.

Ruw materiaal

Om containers zo efficiënt mogelijk te laden is het transporteren van ruw materiaal een uitkomst. Met ruw materiaal wordt bamboe halffabricaten bedoeld in de vorm van plank of balken met een standaard afmeting. Dit heeft twee grote voordelen. Ten eerste is de ruimte in de containers, vanwege de vereenvoudigde vorm van de te transporteren goederen, optimaal te benutten. En ten tweede blijft de verwerking van de bamboestrips volledig in China, of Zuid-Amerika, wat een positief invloed zal hebben op de lokale welvaart. In Europa zouden dan, in dezelfde productielijnen als waar nu gelamineerd hout wordt geproduceerd, het ruw materiaal verlijmd worden tot gelamineerde elementen. Hiervoor zou er één of meerdere standaard maten bepaald moeten worden, die de kosten aan bewerking in Europa moeten beperken. Denk hierbij aan een standaardbreedte van het ruw materiaal dat per 10 of 20 mm oploopt. Dit voorkomt extra bewerkingskosten en eventueel zaag- en schaafafval.

Prijzen

De prijzen voor gelamineerde bamboeproducten loopt heel erg uit een. De prijs is sterk afhankelijk van het aantal bewerkingen en de bestelde hoeveelheid. De standaard prijzen van bijvoorbeeld BambooTeq en Bamboo Import Europe liggen rond de € 4.000,- per m³. Dit zijn prijzen voor standaard liggers met een vaste afmeting. Wanneer grotere hoeveelheden besteld worden zal de prijs vanzelfsprekend lager worden. Bij Ecobam is de prijs per m³ een stuk lager. De prijs⁴⁸ die Ecobam rekent voor een m³ gelamineerd bamboe is € 2.250,-. Dit is bijna 50% lager dan prijzen van BambooTeq en Bamboo Import Europe. Waar dit verschil door komt is niet duidelijk, maar het zou kunnen komen doordat Ecobam een dochteronderneming is van Green-Boo, die de bamboeproducten produceert. Dit heeft als gevolg dat er geen echte tussenhandel is, waardoor de prijs lager uit komt. Natuurlijk is € 2.250,- nog steeds geen bedrag waarmee bamboe concurrerend zou kunnen zijn voor gelamineerd hout. De prijs voor gelamineerd hout ligt tussen de € 500,- tot € 750,- per m³. Hierbij zijn € 250,- tot € 500,- euro voor grondstofkosten en € 250,- productiekosten. De grondstofkosten van gelamineerd bamboe zullen op basis van de prijs van Ecobam nog minstens 60 tot 75% lager uit moeten komen. Dit is afhankelijk van de reductie van materiaal die als uitkomst van de casus komt. Doordat gelamineerd bamboe vanwege de hogere sterkte en stijfheid slanker gedimensioneerd kan worden, wordt er al op materiaal bespaard. Gelamineerd bamboe hoeft daarom qua prijs niet gelijkwaardig te zijn aan gelamineerd hout. In hoofdstuk 6 is tevens aan de hand van de uitkomsten van de casus gekeken naar het uiteindelijke kostenverschil.

⁴⁸ Gesprek Ecobam, 4 november 2015

4.3 ECOLOGISCH KOSTEN

4.3.1 Probleemstelling

Waarom kijken naar de ecologische kosten van een constructiemateriaal? Omdat wereldwijd een besef is ontstaan dat de manier waarop er met grondstoffen wordt omgegaan niet alleen gevolgen heeft voor het ecosysteem, maar ook voor de volksgezondheid. In deze zin worden de drie milieuproblemen genoemd.

1. Uitputting van grondstoffen
2. Aantasting van ecosystemen
3. Aantasting van humane gezondheid ⁴⁹

Eind jaren 60, begin jaren 70 van de vorige eeuw is er voor het eerst bezorgdheid geuit over de manier waarop de wereldbevolking groeit en de problemen die daaruit ontstaan. De Club van Rome heeft in 1972 een rapport gepubliceerd genaamd; *De grenzen aan de groei*. In *De grenzen aan de groei* worden variabelen als bevolkingsgroei, industrialisatie en uitputting van grondstoffen geïmplementeerd in verschillende scenario's. Ondanks nieuwe technieken en ontwikkelingen is inmiddels bekend dat een ongunstig scenario het dichtst bij de werkelijkheid is gekomen. Er dient nog meer focus gelegd te worden op het gebruik van grondstoffen en de groei en ontwikkeling van welvaart. Omdat in dit onderzoek onmogelijk het hele probleem in kaart gebracht kan worden, wordt het onderzoek beperkt tot de toepassing van bouwmaterialen; in het bijzonder constructieve materialen.

4.3.2 Uitputting van grondstoffen

De uitputting van grondstoffen is een belangrijk onderdeel van de milieuproblematiek. Volgens verschillende prognoses is het binnen 50 jaar, wanneer er geen nieuwe, goedkopere winningstechnieken worden ontwikkeld, niet meer mogelijk om bepaalde metalen uit de grond te winnen.⁵⁰ Zink is een goed voorbeeld van een metaal dat op korte termijn niet economisch rendabel meer is om te winnen. Het zou dan goedkoper zijn om gebruikt zink opnieuw te gebruiken, of een alternatief materiaal te gebruiken.



Figuur 4.1 – Logo's van PEFC⁵¹ en FSC⁵²

Logo's van PEFC en FSC. De logo's zijn terug te vinden op alle producten die vervaardigd worden van hout dat afkomstig is van beheerde bossen.

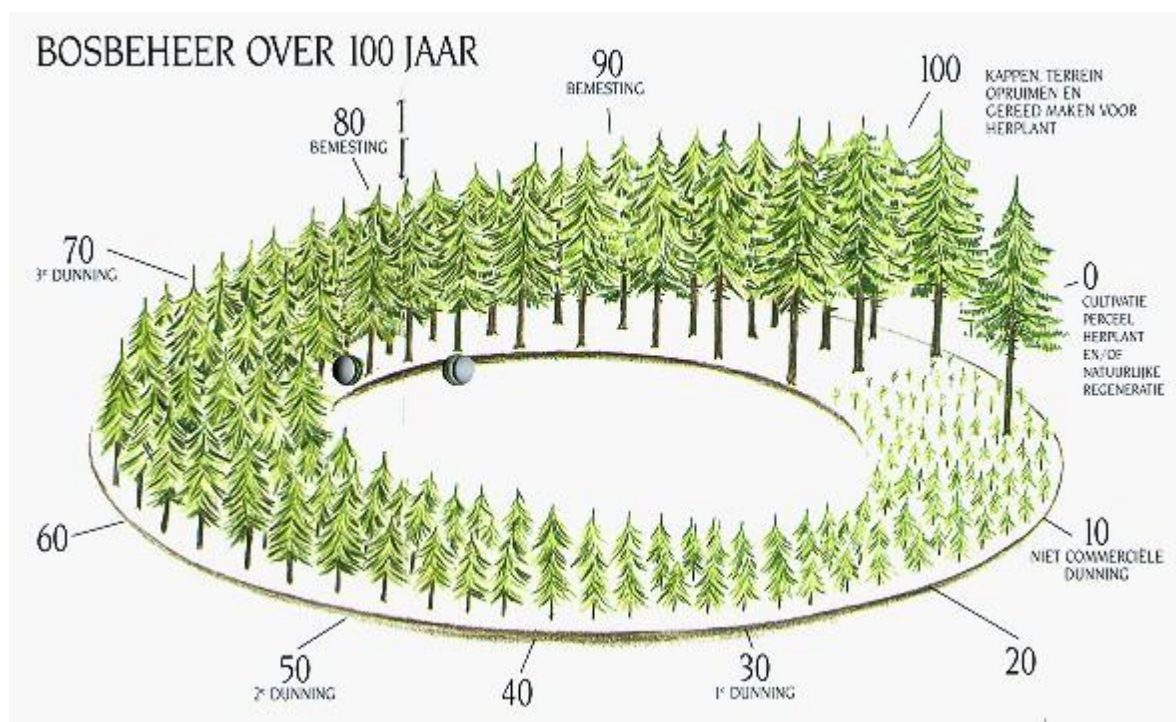
⁴⁹ Dobbels & Alberts – *Milieueffecten van bouwmaterialen*, 2001

⁵⁰ Meadows et al, *De grenzen voorbij*, 1971

⁵¹ <http://www.pefc.org>, bezocht: januari 2016

⁵² <http://www.fsc.nl>, bezocht: januari 2016

Er dient gekeken te worden naar de bouwmaterialen die we toepassen. De voorkeur gaat daarbij uit naar grondstoffen die een eindeloze levenscyclus hebben of die van vernieuwbare bronnen komen. Plantaardige materialen zijn daarmee een schoolvoorbeeld van materialen die, wanneer goed beheerd, oneindig gebruikt zouden kunnen worden. Hier komt bamboe als grondstof in beeld. De houtproductie voor gebruik in de bouw gebeurt tegenwoordig in beheerde bossen. Hout dat uit deze bossen afkomstig is heeft een certificering in FSC of PEFC. Voor de productie van gelamineerd hout wordt in Europa vooral vuren gebruikt. Wanneer er eisen zijn aan duurzaamheid van het materiaal, bijvoorbeeld als het buiten wordt toegepast, kan er voor grenen of lariks gekozen worden. Al deze houtsoorten groeien in bossen voornamelijk in Scandinavië en Rusland. Hoewel inlands hout in Nederland steeds meer wordt ingezet in de bouw is grootschalige productie vanwege de grootte van het bosoppervlak in Nederland niet mogelijk.⁵³



Figuur 4.2 – Bosbeheer met een cyclus van 100 jaar.⁵⁴

In figuur 4.2 is te zien hoe de cyclus is van het bosbeheer in Scandinavië. Bossen worden zorgvuldig beheerd en over 100 jaar zijn er verschillende moment dat er gehandeld moet worden om het ecosysteem te beheren en de kwaliteit van het bos te behouden. Na 100 jaar kan er gekapt worden voor productie.

⁵³ Dobbeltsteen & Alberts – *Milieueffecten van bouwmaterialen*, 2001

⁵⁴ Wiertz, *Duurzaam bosbeheer in Zweden en Finland*, Zweeds-Finse Houtinformatie, 1990)

Voordelen korte cyclus bamboe

In het geval van bamboe is deze cyclus aanzienlijk korter. De bamboe die Ecobam levert wordt binnen 4 tot 5 jaar gekapt. Een groot voordeel van bamboe ten opzichte van naaldhout is dat de kapcyclus korter is. Er kan tot 20 keer vaker bamboe gekapt worden dan naaldhout. Er zou jaarlijks tot 25% van het totale bosoppervlak gekapt kunnen worden. Een bamboebos is, omdat het geen op zichzelf staande boom is, maar een wortelsysteem heeft dat jaarlijks 4 tot 5 scheuten produceert, een zelf herstellend bos. Bij de groei van planten wordt CO₂ uit de lucht onttrokken en opgeslagen. Bij dit proces komt zuurstof vrij. Door deze eigenschap is het mogelijk om bamboe producten in Nederland toe te passen die CO₂-neutraal zijn. Regenwouden worden daarmee de longen van de aarde genoemd. Door de kap en verbranding van veel bosoppervlak de afgelopen decennia is de invloed van bossen op de samenstelling van de atmosfeer afgenomen. Door het creëren van grootschalige bamboe productiebossen, zou bamboe de functie van de regenwouden deels over kunnen nemen. Hoewel tropische hardhoutsoorten niet tot nauwelijks worden gebruikt voor de toepassing van gelamineerde constructies, wordt het door de duurzame eigenschappen van het materiaal wel veel gebruikt voor kozijn en deuren die toegepast worden in een buitenklimaat.

Een ander voordeel van bamboebossen is dat ze weinig grondstoffen uit de grond onttrekken. Bij het toepassen van houtplantages of productie bossen ontstaan monoculturen. De grondstoffen die de bomen tijdens hun groei onttrekken uit de grond verdwijnen uit de bodem en putten deze op lange termijn uit. Hierdoor is het noodzakelijk dat bij bosbeheer de grond verrijkt blijft worden. Ook dit is een onderdeel van duurzaam bosbeheer. Bamboe daarentegen onttrekt weinig grondstoffen uit de bodem en groeit zonder dat er een kwetsbaar ecosysteem nodig is. Het biedt daarmee ook een oplossing aan de ontbossing en erosie van voormalig bosoppervlak.

Alle bovengenoemde eigenschappen wekken de indruk dat bamboe een geschenk is en een oplossing kan zijn voor veel problemen met betrekking tot duurzame (bouw-)materialen. Maar er moet ook gekeken worden naar de productie van de uiteindelijk toe te passen halffabricaten.

4.3.3 Aantasting van ecosystemen

Onderzoek naar de ecologische kosten van bamboe halffabricaten zijn in het verleden gedaan door Van der Lugt. Hij heeft zowel voor een MSc als een PhD onderzoek gedaan naar het milieutechnisch duurzaam toepassen van bamboe producten. Tijdens zijn PhD onderzoek heeft Van der Lugt van verschillende bamboe producten de duurzaamheid onderzocht. Het interessants, om een vergelijking met gelamineerde constructies te kunnen maken, is het onderzoek naar Plybamboo. Plybamboo is plaatmateriaal dat wordt vervaardigd van bamboe. Omdat hij in zijn onderzoek Plybamboo vergelijkt met plywood is er een verhouding op te maken tussen de twee materialen. In het onderzoek gebruikt Van der Lugt de term Eco-costs.⁵⁵ Eco-costs, of Eco-kosten, zijn kosten die gemaakt worden ter preventie of compensatie van uitputting van grondstoffen of aantasting van milieu door een product of materiaal. Een voorbeeld van Eco-kosten is een investering in duurzame energie.⁵⁶



Figuur 4.3 - Links plain-pressed bamboe, rechts side-pressed bamboe⁵⁷

Voor zowel Plywood als Plybamboo is een Eco-kosten berekening gemaakt. Met Plywood wordt een triplex plaat bedoeld. Plybamboo is een plaat van bamboe strips die of side-pressed of plain-pressed is verlijmd. Een plaat side-pressed Plybamboo kan eigenlijk gezien worden als een grote afmeting materiaal dat benodigd is als basis voor gelamineerd bamboe. Als de Eco-kosten voor Plywood en Plybamboo naast elkaar gezet worden kunnen de volgende waarden opgemaakt worden.

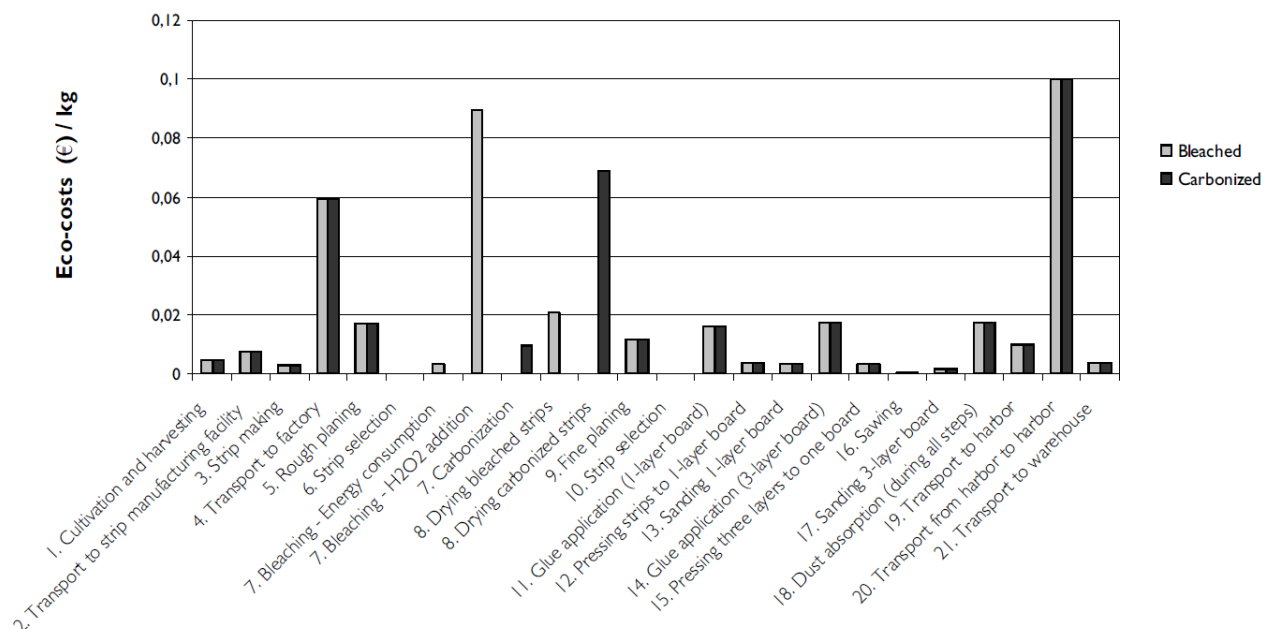
Materiaal	Totale Eco-kosten €/kg
Plywood (Vuren)	0,295
Plybamboo 1 laag side-pressed (bleached)	0,399
Plybamboo 1 laag side-pressed (carbonized)	0,364

Hierbij zijn de Eco-kosten voor Plywood hoger dan die in werkelijkheid zullen liggen voor gelamineerd hout, omdat er meer bewerkingen nodig zijn om Plywood te produceren. De Eco-kosten voor Plybamboo geven een goede indicatie van de werkelijke kosten voor bamboe als basismateriaal voor gelamineerd bamboe.

⁵⁵ Vogtländer, *Ecocosts/value ratio website*: www.ecocostsvalue.com, 2008, bezocht: januari 2016

⁵⁶ De Jonge, *Cost Effectiveness of Sustainable Housing Investments*, 2005

⁵⁷ <http://www.moso.eu/en/bamboo/how-it-s-made>, bezocht: januari 2016



Figuur 4.4 – Overzicht van de onderdelen voor het bepalen van de Eco-kosten van Plybamboo⁵⁸

Uit figuur 4.4 kan direct opgemaakt worden dat de Eco-kosten om de bamboe naar Nederland te transporteren een groot aandeel hebben in de totale Eco-kosten. Van de totale Eco-kosten is ongeveer 25% gerekend voor zeetransport. Hiermee wordt nogmaals duidelijk dat het noodzakelijk is om zo efficiënt mogelijk om te gaan met de manier van transporteren. Zo heeft het niet alleen invloed op de financiële kosten, maar ook op de ecologische kosten.

De Eco-kosten voor bamboe en hout voor plaatmateriaal is nagenoeg gelijk wanneer de kosten voor het zeetransport wegvallen. Hieruit kan opgemaakt worden dat bij de bewerking van de bamboe om ze gereed te maken voor productie er ook nog veel kan verbeteren. Wanneer bamboeproducten lokaal gebruikt worden is het product in veel gevallen al CO₂-neutraal. Dit zou in Nederland en Europa alleen kunnen wanneer er dichterbij huis, denk aan Zuid-Europa, productiebossen gerealiseerd zouden worden.

⁵⁸ Van der Lugt, *Design Interventions for Stimulating Bamboo Commercialization*, 2008

4.4 CONCLUSIE KOSTEN

Gelamineerd bamboe is in principe toe te passen in Nederland. Ondanks dat er nog geen concrete karakteristieke waarden zijn vastgesteld, is het via verschillende leveranciers verkrijgbaar. De kosten van gelamineerd bamboe verschillen nog veel per leverancier, maar wanneer er grotere hoeveelheden ingekocht zullen worden voor de productie van constructieve elementen zal dit een positief effect hebben op de prijs. De prijs zal niet hoeven dalen tot de prijs van gelamineerd hout, omdat er slanker gedimensioneerd kan worden.

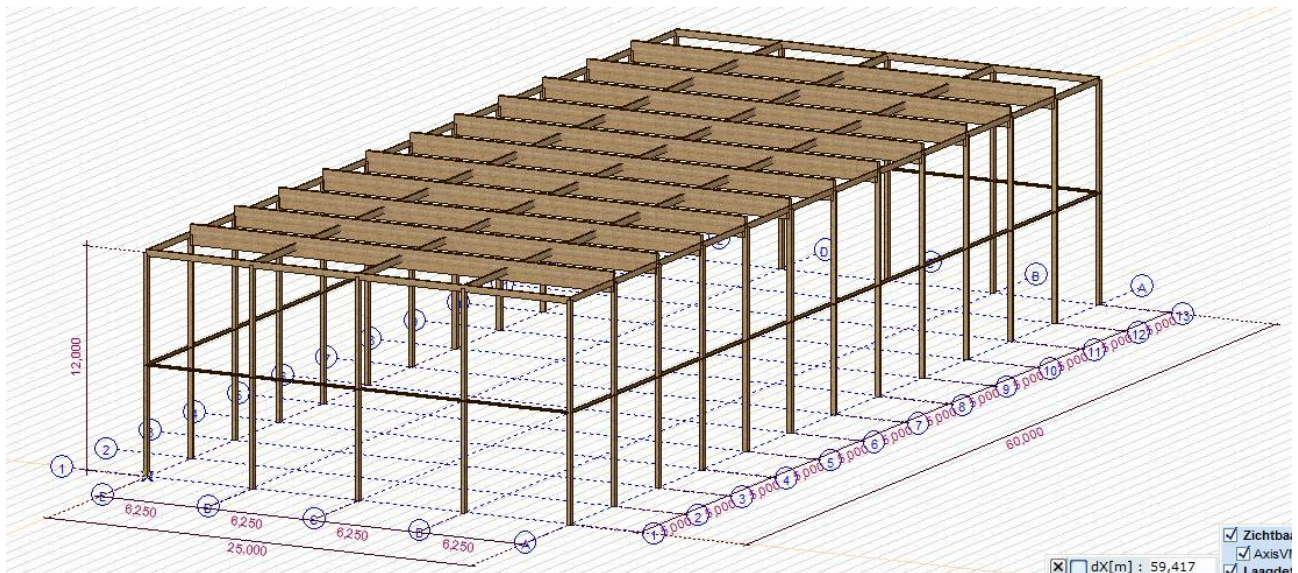
Er zou niet alleen aanzienlijk op transport bespaard kunnen worden, door het slim benutten van transportruimte, maar ook door het eventueel verkleinen van de afstand tussen productie en toepassing. Door het realiseren van productiebossen in bijvoorbeeld Zuid-Europa, waar het klimatologisch gezien wellicht mogelijk is om grote bamboesoorten als Moso en Guadua te laten groeien. Hierdoor wordt bamboe als product op kortere afstand beschikbaar. Om te bepalen of dit een realistische optie is, zal onderzocht moeten worden of het rendabel is en op welke schaal dit toegepast zou moeten worden.

Wat betreft ecologische kosten is bamboe een product met veel potentie. De bewerkingen die nodig zijn om de bamboe te verwerken in bamboe halffabricaten zijn nog niet optimaal. Hierdoor worden de positieve eigenschappen die bamboe heeft tijdens de groei gereduceerd. Wanneer de halffabricaten kunnen worden gemaakt met technieken die minder negatieve effecten hebben, zullen bamboeproducten ook in Europa wellicht CO₂-neutraal geproduceerd kunnen worden.

5 CASUS

5.1 INLEIDING

Om de bevindingen over gelamineerd bamboe in een constructief plaatje te zetten, zijn er twee ontwerpen uitgerekend. Het betreft twee verschillende ontwerpen om de variatie die mogelijk is in kaart te brengen. Beide ontwerpen zijn uitgewerkt in gelamineerd bamboe en gelamineerd hout. De uitkomst is een overzicht van de twee materialen en waarin deze van elkaar verschillen. Wat vooral interessant is op voorhand, is de mate waarin gelamineerd bamboe slanker gedimensioneerd zou kunnen worden. Dit heeft namelijk invloed op de prijs van het geheel. Omdat de prijs van gelamineerd bamboe hoger zal zijn dan gelamineerd hout is het essentieel om dusdanig slank te dimensioneren in gelamineerd bamboe, dat dit het prijsverschil kan compenseren. In de conclusie wordt hierop teruggekoppeld en in hoofdstuk 6 zal de uiteindelijke balans opgemaakt worden.



Figuur 5.1 – Afbeelding van industriële hal

Figuur 5.1 is een afbeelding van het model van de industriële hal. Deze heeft een ligger-kolom structuur. De ligger en de kolom van de maatgevende as zullen worden getoetst. Om in beeld te brengen wat de invloed is van verschillende brandweerstandseisen, zijn de ligger en de kolom van de maatgevende as doorgerekend. Elke ligger en kolom is getoetst aan een brandweerstand van 30, 60, 90 en 120 minuten. Dit om inzichtelijk te maken wat het verschil is tussen gelamineerd hout en gelamineerd bamboe, wanneer er een brandweerstandeis is.



Figuur 5.2 – Afbeelding van trainingshal manege

Figuur 5.2 is een afbeelding van het model van de trainingshal bij een manege. Deze constructie is opgebouwd uit 3-scharnierspanten. De kolommen en liggers van de spanten verlopen taps en hebben een enkele vingerlas in de knie. Hierdoor is ook inzichtelijk wat de verschillen zijn tussen gelamineerd hout en gelamineerd bamboe, wanneer er speciale vormen en verbindingen worden toegepast.

Sterkteklasse gelamineerd hout

Uit de sterkte tests is gebleken dat het materiaal dat is getest, niet van de kwaliteit was dat de waarden die eruit kwamen, toe te passen zijn voor gebruik in de casus. Er is, vanwege de lagere elasticiteitsmodulus, niet aangetoond dat gelamineerd bamboe een hogere sterkteklasse zou hebben dan gelamineerd hout. Lamboo heeft dit welk aangetoond. De karakteristieke waarden die gepubliceerd zijn op de website van Lamboo zijn onderbouwd met normen. Tevens zijn er meerdere projecten uitgevoerd in gelamineerd bamboe getuige de foto's die gepubliceerd zijn op de website. Aan de hand van deze informatie is gekozen om de karakteristieke waarden van Lamboo te hanteren voor de berekeningen in de casus.

5.2 HOOFDBEREKENING

5.2.1 Industriële hal

Voor de hoofdberekening van de industriële hal uitgevoerd in gelamineerd hout wordt verwezen naar bijlage II. Voor de hoofdberekening van de industriële hal uitgevoerd in gelamineerd bamboe wordt verwezen naar bijlage III.

Liggers

De ligger van de constructie heeft in de uitvoering in gelamineerd hout een doorsnede van 220x1400mm. De constructie is volledig berekend in GL24h, wat de standaard sterkteklasse voor gelamineerd hout is. Dezelfde ligger uitgevoerd in gelamineerd bamboe, GLB, heeft een doorsnede van 200x1100mm. Dit is een geringe reductie ten opzichte van de doorsnede van ligger in GL24h. Dit heeft te maken met het feit dat er een brandbelasting is toegepast op 3 zijden van de ligger. Hierdoor is de breedte van de ligger niet optimaal te reduceren, omdat er aan 2 kanten inbranding optreedt. Voor de berekening van brand op de GLB ligger is een inbrandsnelheid van $0,55\text{mm/min}$ toegepast. Standaard gelamineerd hout heeft een inbrandsnelheid van $0,7\text{mm/min}$ ⁵⁹. De inbrandsnelheid van $0,55\text{mm/min}$ wordt normaal gesproken aangehouden voor loofhout waarvan de volumieke massa hoger is dan 450kg/m^3 . Omdat gelamineerd bamboe een volumieke massa heeft van 700kg/m^3 , ligt de inbrandsnelheid logischerwijs lager dan bij naaldhout. Uit een onderzoek naar de brandwerendheid van kozijnen is bamboe getest en is gebleken dat het een inbrandsnelheid heeft van $0,5\text{mm/min}$ ⁶⁰. Dit is een afwijking van 10%, daarmee kan veilig worden aangenomen dat de inbrandsnelheid niet hoger ligt.

De ligger uitgevoerd in GLB heeft een reductie van de doorsnede van 28,7% ten opzichte van de ligger uitgevoerd in GL24h. Dat is met een brandweerstandseis van 60 minuten. Om te bepalen of de lengte van de brandweerstandseis van invloed is op de reductie van de doorsnede is er een overzicht gemaakt met verschillende brandweerstandseisen.

Ligger												
	30 min			60 min			90 min			120 min		
	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)
GL24h	200	1400	280000	220	1400	308000	260	1520	395200	300	1680	504000
GLB	180	1050	189000	200	1100	220000	230	1300	299000	260	1550	403000
Reductie	32,5%			28,6%			24,3%			20,0%		

Tabel 5.1 – Doorsnedes liggers bij verschillende brandweerstandseisen

Duidelijk wordt aan de hand van deze tabel dat de reductie van de doorsnede afneemt als de brandweerstandseis hoger wordt. Er zou geconcludeerd kunnen worden dat, met de toegepaste inbrandsnelheid van $0,55\text{mm/min}$, gelamineerd bamboe bij een lagere brandweerstandseis een hogere reductie oplevert.

⁵⁹ NEN-EN 1995-1-2, 2011

⁶⁰ Ronald Huizinga, *Measurement protocol*, 2012

Kolommen

Als dezelfde gegevens op een rij gezet worden voor de doorsnedes van de kolommen levert dat de volgende tabel op.

	Kolom											
	30 min			60 min			90 min			120 min		
	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)	b(mm)	h(mm)	A(mm ²)
GL24h	200	300	60000	220	300	66000	260	350	91000	300	350	105000
GLB	180	250	45000	200	250	50000	220	300	66000	250	300	75000
Reductie	25,0%			24,2%			27,5%			28,6%		

Tabel 5.2 – Doorsnedes kolommen bij verschillende brandweerstandseisen

Tabel 5.2 toont dat de reductie van de doorsnede juist toeneemt bij een hogere brandweerstandseis. In tegenstelling tot liggers heeft de lagere inbrandsnelheid een positieve invloed op de reductie van de doorsnede, naar mate de brandweerstandseis toeneemt.

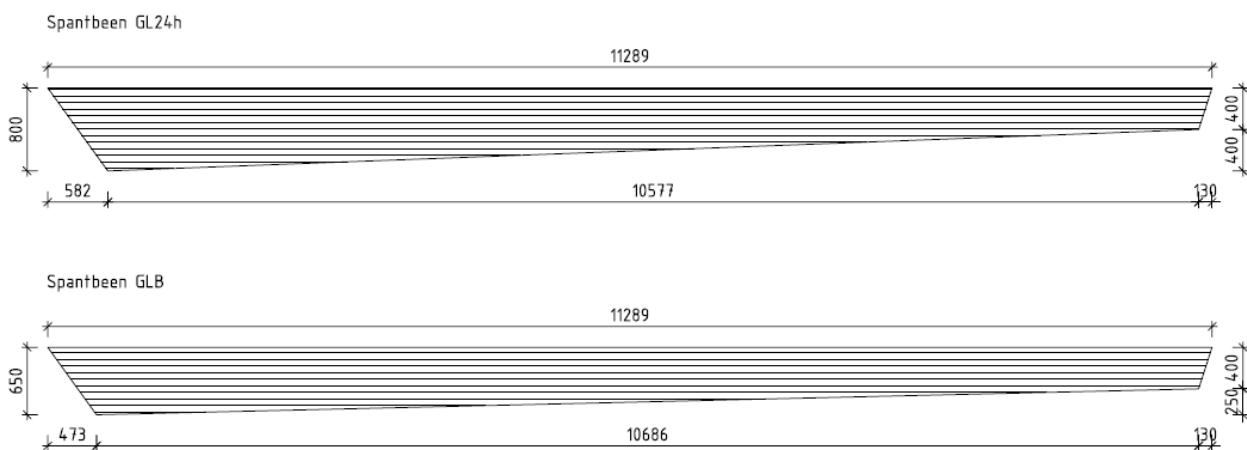
Wanneer de hogere dichtheid van bamboe inderdaad een positieve invloed heeft op het brandgedrag, zal dit van zichtbaar zijn in de reductie van de doorsnede ten opzichte van gelamineerd hout. Er kan gezegd worden dat deze invloed bij kolommen, belast op axiale druk, groter is dan bij liggers, belast op buiging.

5.2.2 Trainingshal manege

Voor de hoofdberekening, detailberekening en tekeningen van de trainingshal van de manege uitgevoerd in gelamineerd hout wordt verwezen naar respectievelijk bijlage IV, V en VI. Voor de hoofdberekening, detailberekening en tekeningen van de trainingshal van de manege uitgevoerd in gelamineerd bamboe wordt verwezen naar respectievelijk bijlage VII, VIII, IX.

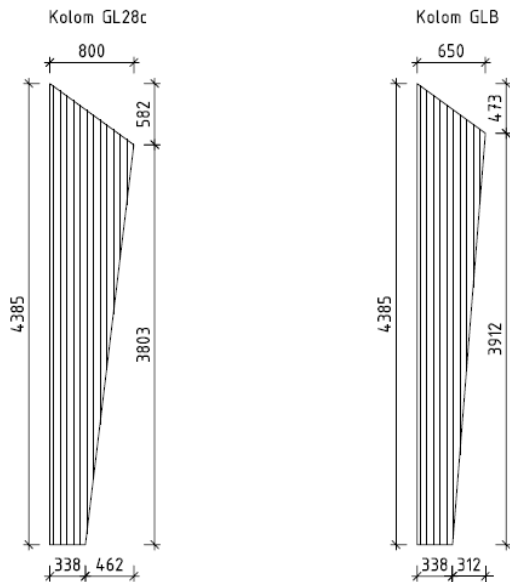
Hoofdspant

De constructie van de trainingshal van de manege bestaat uit 3-scharnierspanten. Hieraan zijn in verband met de afmetingen van de piste, ook eisen aan de constructie. Vanwege deze eisen dient de kolom van het spant onder een bepaalde hoogte te blijven. Om die reden is de kolom van het hoofdspant uitgevoerd in GL28c. Dit maakt de vergelijking met GLB wel moeilijker, omdat dit een duurder product is. Het verschil tussen GL24h en GL28c is de kwaliteit van de buitenste lamellen. De h in GL24h staat voor homogeen en de c in GL28c staat voor combined. GL24h is gelamineerd hout dat opgebouwd is uit hout van dezelfde houtsterkteklasse C24. GL28c is opgebouwd uit 2 houtsterkteklassen. De kern van de elementen is C24 en de buiten 2 lamellen dienen houtsterkteklasse C28 te zijn om het element als GL28c te mogen beschouwen. Het spantbeen is wel uitgevoerd in GL24h.



Figuur 5.3 – Afbeelding van de twee uitvoering van het spantbeen

Een vergelijking van de spant twee uitvoeringen van het spantbeen levert het volgende resultaat. De ligger uitgevoerd in GL24h heeft een oppervlakte van $6,61 \text{ m}^2$. Dezelfde ligger uitgevoerd in GLB heeft een oppervlakte van $5,79 \text{ m}^2$. Daar komt bij dat het spantbeen uitgevoerd in GL24h een dikte heeft van 200mm. Het spantbeen uitgevoerd in GLB heeft een dikte van 140mm. De dikte alleen is daarmee al een reductie van 30%. De totale reductie van het spantbeen is 39%.

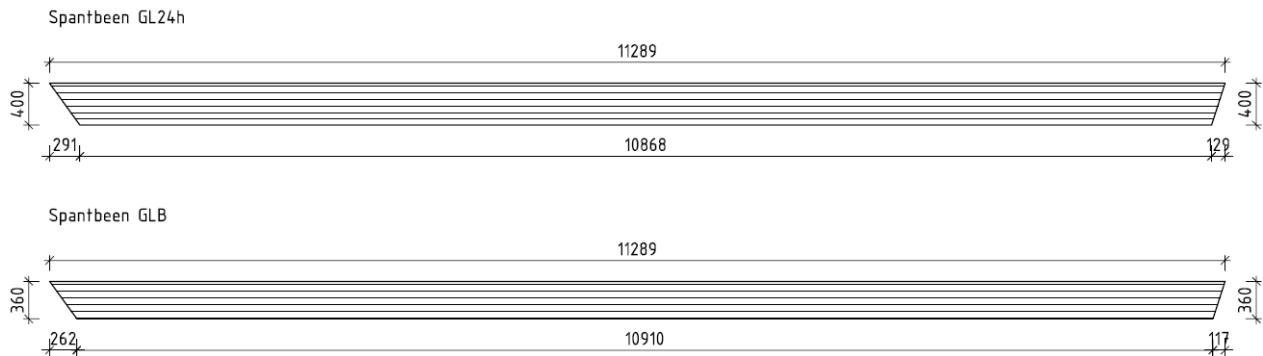


Figuur 5.4 – Afbeelding van de twee uitvoeringen van de kolom

Ook voor de vergelijking van de kolommen komt op een reductie van 39%. Hierbij moet wel rekening gehouden worden dat de kolom is uitgevoerd in GL28c en niet GL24h. Ondanks dat er voor gelamineerd hout een hogere sterkteklasse nodig is, blijft voor gelamineerd bamboe de reductie ten opzichte van gelamineerd hout gelijk.

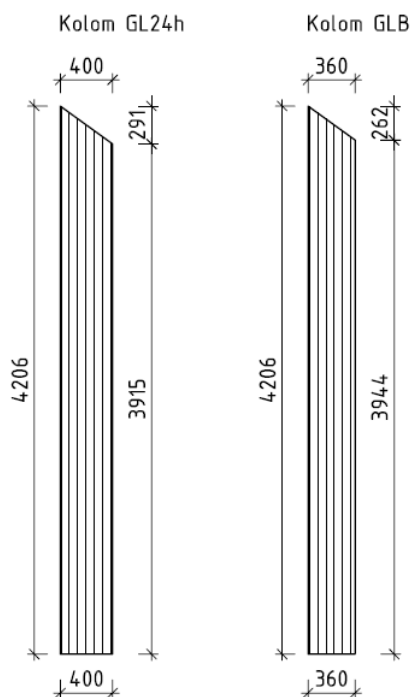
Kopspant

De kopspanten zijn vanzelfsprekend slanker gedimensioneerd vanwege de lagere belasting. De hoofdvorm van de kopspanten is gelijk aan die van de hoofdspanten. De kopspanten zijn echter samengesteld uit rechte kolom en ligger. Hierdoor valt de controle voor taps verlopende liggers weg en is de berekening eenvoudiger. De vergelijking tussen gelamineerd hout en gelamineerd bamboe zal voor de kopspanten een beter beeld geven van de materialen.



Figuur 5.5 – Afbeelding van de twee uitvoeringen van het spantbeen

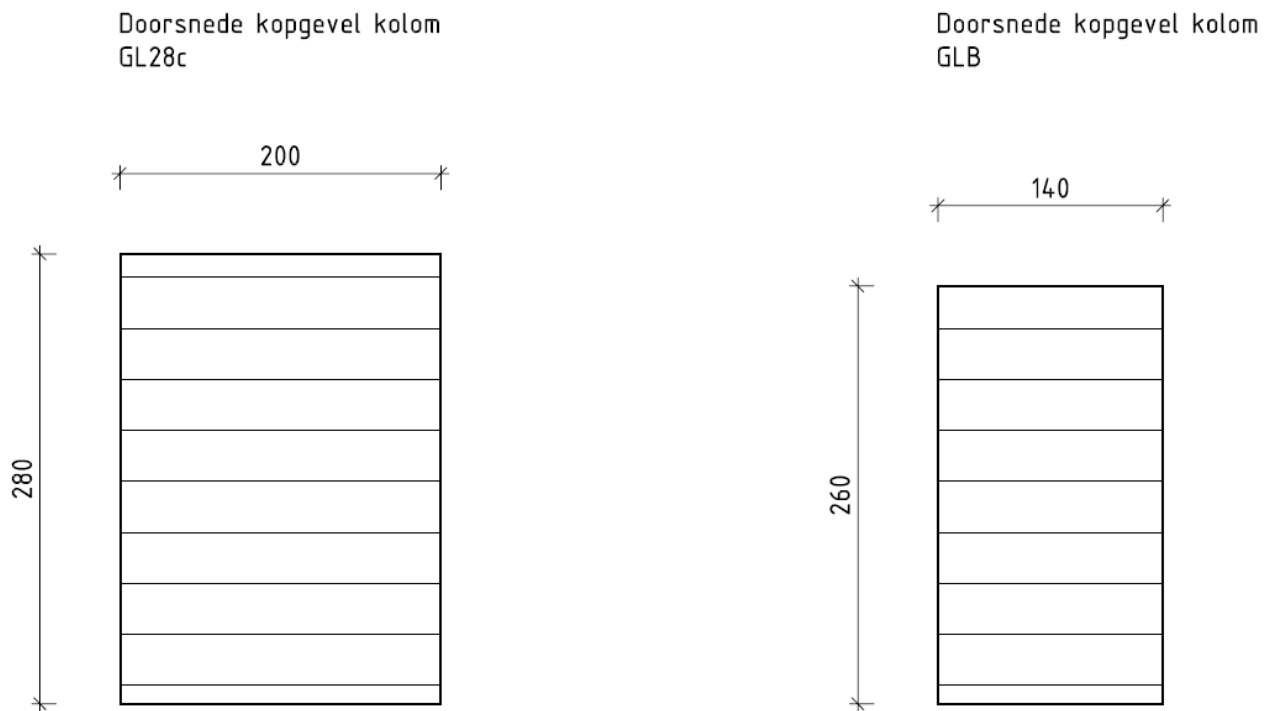
De uitvoering in GLB heeft voor het spantbeen een reductie van 36% ten opzichte van de uitvoering in GL24h. In dit geval is dat, vanwege het feit dat de elementen geen verlopende doorsnede hebben, een reductie van de doorsnede. Voor de kolom van het kopspant komt dit ook overeen.



Figuur 5.6 – Afbeelding van de twee uitvoeringen van de kolom

Kopgevelkolommen

Voor de kopgevel kolommen geldt ook dat ze zijn opgebouwd uit een niet verlopende doorsnede. Daarmee is de reductie in de doorsnede ook de reductie voor het element.

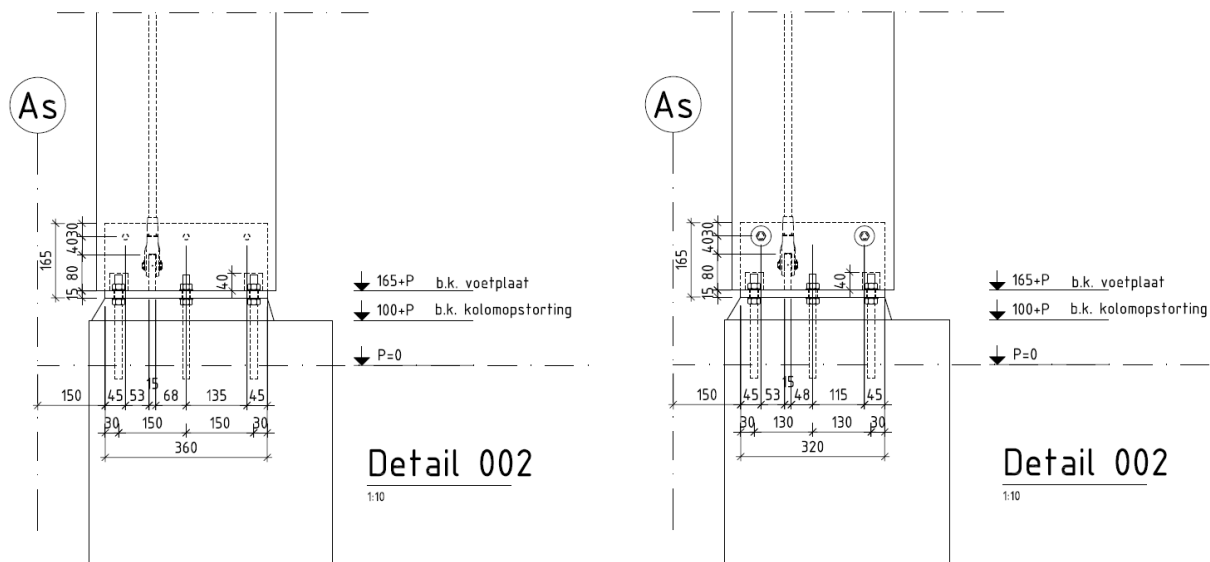


Figuur 5.7 – Afbeelding van doorsnedes van kopgevelkolom

Dit levert voor de doorsnedes wederom een reductie op van 35%.

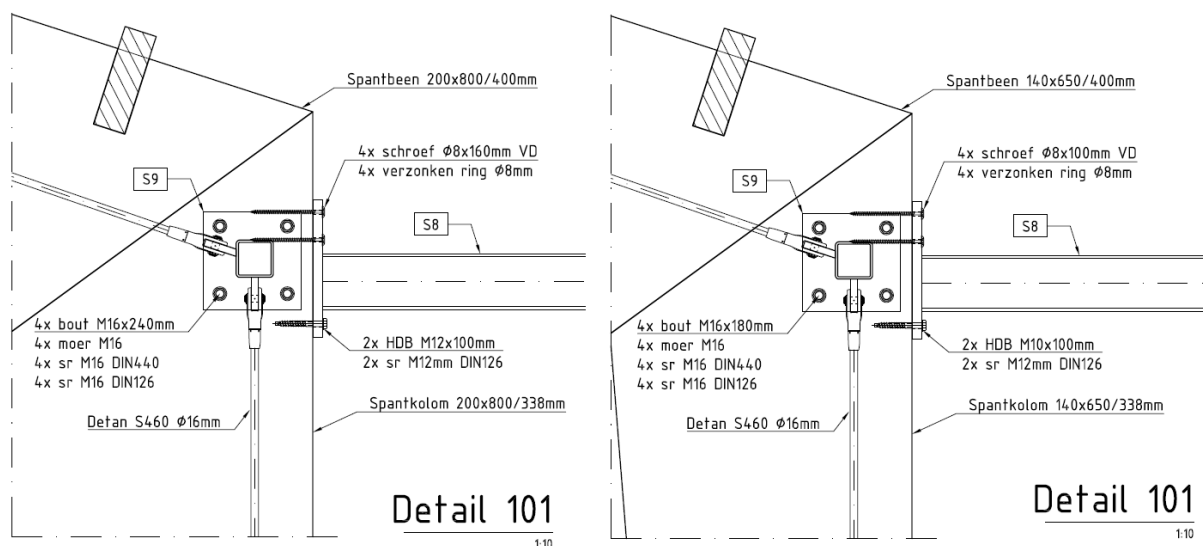
5.3 DETAILBEREKENING

Het detailleren in bamboe levert ook een bijdrage aan de materiaalbesparing bij constructies in gelamineerd bamboe. Doordat de treksterkte van gelamineerd bamboe zeven maal hoger is dan gelamineerd hout, is de kans op splijten van een element in een verbinding lager. De druksterkte parallel aan de vezelrichting van gelamineerd bamboe is bijna vijf maal hoger dan dezelfde druksterkte van gelamineerd hout. De druksterkte loodrecht op de vezel is zelfs ruim acht maal hoger in het geval van gelamineerd bamboe. Al deze hogere sterktes zorgen ervoor dat in details uitgevoerd in gelamineerd bamboe aanzienlijk kleinere of minder verbindingsmiddelen nodig zijn.

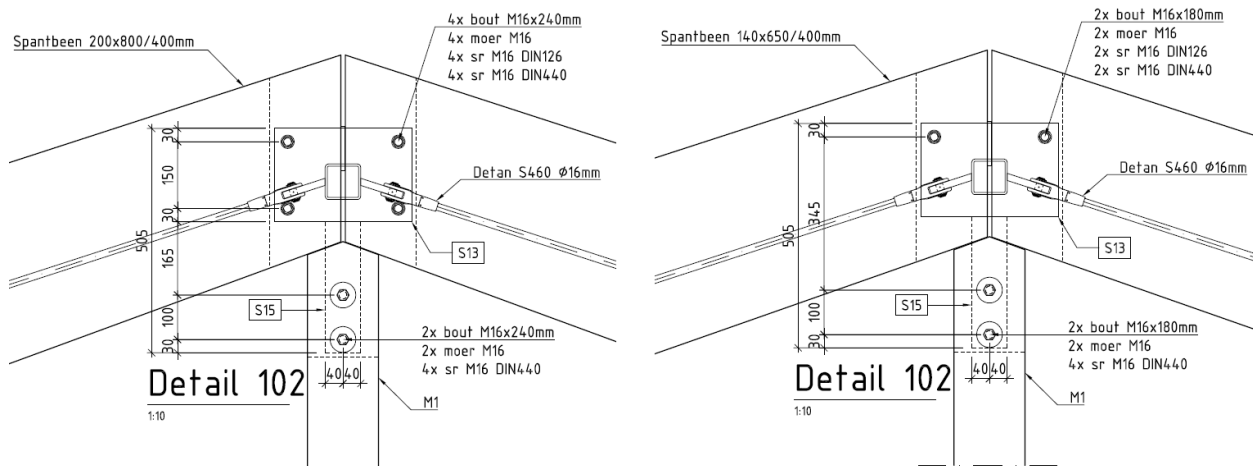


Figuur 5.8 – Detail van de trainingsshal manege, links gelamineerd hout, rechts gelamineerd bamboe

In figuur 5.8 is detail 002 afgebeeld. Dit is de aansluiting van de kolom van het kopspar. Uit de detailberekening is gebleken dat het aantal houtdraadbouten dat benodigd was om de horizontale kracht in het detail op te vangen, voor de uitvoering in gelamineerd bamboe minder is. Dit is voor dit detail een besparing van 33% van de verbindingsmiddelen. Voor detail 101, in afbeelding 5.9, geldt dat de schroeven 60mm korter uitgevoerd kunnen worden en de houtdraadbouten 17% dunner. Dit zal een kostenbesparing opleveren.



Figuur 5.9 – Detail van de trainingsshal manege, links gelamineerd hout, rechts gelamineerd bamboe



Figuur 5.10 – Detail van de trainingshal manege, links gelamineerd hout, rechts gelamineerd bamboe

Voor detail 102, afgebeeld in figuur 5.10, geldt dat het aantal bouten toegepast gehalveerd kan worden. En omdat de spanten bij de gelamineerde houtconstructie een dikte hebben van 200mm en de spanten uitgevoerd in gelamineerd bamboe een dikte van 140mm, kunnen de bouten ook 60mm korter uitgevoerd worden.

Materiaalbesparing

Doordat gelamineerd bamboe sterker is, waardoor slanker te dimensioneren is en waardoor details met minder of kleinere verbindingsmiddelen uitgevoerd kunnen worden, levert dit een directe bijdrage aan materiaalbesparing. Dit is een materiaalbesparing die direct bijdraagt aan een van de in hoofdstuk 4.3 genoemde milieuproblemen⁶¹. Los van de milieuproblemen is de materiaalbesparing uiteraard ook een financiële besparing. Het feit dat gelamineerd bamboe per m³ duurder is wordt door de besparing van verbindingsmiddelen ook weer gecompenseerd.

⁶¹ Ir. Andy vd. Dobbelssteen & ir. Kees Alberts – Milieueffecten van bouwmaterialen

5.4 CONCLUSIE CASUS

De hogere elasticiteitsmodulus en sterke fysische eigenschappen van gelamineerd bamboe maken het een interessant product om te concurreren met gelamineerd hout. Er moet echter wel rekening worden gehouden met de herkomst van het product en de manier waarop de karakteristieke waarden zijn bepaald. Voor Lamboo is de manier van testen beschreven en ook duidelijk is dat Guadua de grondstof is voor hun gelamineerde elementen. Dit heeft een voordeel ten opzichte van Moso, maar in Nederland is voor-als-nog alleen gelamineerd bamboe vervaardigd van Moso bamboe te krijgen. Voor het toepassen van gelamineerd bamboe als constructiemateriaal zal nog gekeken moeten worden naar de mogelijkheden van het importeren van, al dan niet gelamineerde, Guadua bamboe.

Slanker dimensioneren

Uit de casus is duidelijk geworden dat, met de rekenwaarden die Lamboo hanteert, gelamineerd bamboe een aanzienlijke reductie heeft ten opzichte van gelamineerd hout. Voor rechte elementen zonder bijzondere vormen ligt de oppervlakte van de doorsnede berekend met sterkteklasse GLB gemiddeld 35% lager dan voor sterkteklasse GL24h. Deze reductie neemt toe wanneer de elementen geen standaard doorsnede hebben en de vormen variëren. De reductie bepaald in deze casus loopt in die gevallen op tot 39%. En dat is in dit geval een reductie op sterkteklasse GL28c. Met gelamineerd bamboe is slanker te dimensioneren. Dit heeft voordelen voor de kosten van gelamineerd bamboe. Maar is ook een voordeel op de ecologische kosten, omdat er minder materiaal nodig is om een gelijkwaardige constructie te realiseren.

Verbindingsmiddelen

Doordat constructies in gelamineerd bamboe slanker uitgevoerd kunnen worden, zullen verbindingsmiddelen in de gebruikte constructie ook kleiner kunnen zijn. De hoge trek- en druksterkte, zowel parallel als loodrecht op de vezel, zorgen ervoor dat gelamineerd bamboe plaatselijk hoge krachten kan opnemen. Zoals het geval is in details waarin stiften, bouten of schroeven zijn toegepast. Deze verbindingsmiddelen kunnen kleiner worden toegepast, of er zullen er minder nodig zijn om krachten tussen elementen over te brengen.

Brandgedrag

Ook op gebied van brandweerstand biedt gelamineerd bamboe voordelen. Door de lagere inbrandsnelheid kan er bij een brandweerstandseis nog steeds slanker worden gedimensioneerd. In het geval van liggers is het zo dat een hogere brandweerstandseis een negatieve invloed heeft op de reductie die GLB biedt ten opzichte van GL24h. Maar in het geval van kolommen neemt de mogelijke reductie juist toe bij een hogere brandweerstandseis.

6 CONCLUSIE & AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIE

Gedeeltelijk is vastgesteld dat gelamineerd bamboe een concurrerend materiaal zou kunnen zijn voor gelamineerd hout. Hier zitten echter nog wel wat haken en ogen aan. Zeker wanneer het in Nederland als constructiemateriaal toegepast dient te worden. De kennis en interesse naar bamboe en bamboeproducten worden steeds groter. Enerzijds doordat het aantal producten dat van bamboe gemaakt wordt snel toeneemt. Denk hierbij aan plaatmateriaal voor interieur en voor exterieur, maar ook aan papier en zelfs kleding. Anderzijds door het groene imago dat bamboe heeft vanwege de eigenschappen tijdens de groei.

Sterkte gelamineerd bamboe

Na de uitgevoerde sterktetests op gelamineerd bamboe en de gepubliceerde waarden die bekend zijn, kan geconcludeerd worden dat gelamineerd bamboe een interessant product is dat nog lang niet uitontwikkeld is. Ten minste niet in Europa. Uit alle publicaties blijkt dat het uiteindelijke product de potentie heeft om te kunnen concurreren met gelamineerd hout. De sterkte en stijfheid van bamboe liggen hoger, het is zwaarder en het is harder dan het standaard in gelamineerde constructies toegepaste hout. Om aan te tonen dat gelamineerd bamboe ook echt sterker is dan gelamineerd hout, zullen er betere en volledige sterktetests gedaan moeten worden op grote schaal. De sterktetests die uitgevoerd zijn in dit onderzoek geven een indicatie, maar zeker niet de uiteindelijke sterkte van het materiaal.

Wat momenteel nog een zwakte is in de gelamineerde bamboe is de las. Hiervoor wordt nu een schuine las gebruikt die de krachten onvoldoende van de ene strip in de andere strip over kan brengen. Bovendien is de lijmverbinding bij dit type las erg zwak. Een oplossing voor dit probleem zou kunnen zijn om de schuine las niet toe te passen. Er zouden elementen gefabriceerd kunnen worden die de maximale lengte hebben van de bamboestrips. Door de strips met dezelfde lengte te verlijmen ontstaat een lat/balk, die gezien zou kunnen worden als een houten lat/balk, die als basis dient voor gelamineerd hout. Doordat de bamboe lat/balk een grotere doorsnede heeft, zou het mogelijk moeten zijn om deze te vingerlassen. Vingerlassen zijn een bewezen vele malen sterkere verbinding dan een schuine las. Wanneer de vingerlengte en toegepaste lijm goed zijn, is de vingerlas sterker dan het basismateriaal.

Bamboe grondstof

Belangrijk voor het uit ontwikkelen van gelamineerd bamboe is de grondstof die wordt gebruikt. Als kandidaten werden Moso en Guadua genoemd. Maar uit onderzoek blijkt dat Guadua als basismateriaal betere eigenschappen heeft om toegepast te worden in constructieve elementen. De meeste bamboeproducten die momenteel op de Nederlandse markt verkrijgbaar zijn komen uit China en zijn van Moso afkomstig. Er zijn wel bedrijven die Guadua bamboe importeren, maar dat zijn volledige stammen, of matten van platgeslagen stammen. Geen halffabricaten. Waar de producten vanuit China, geproduceerd van Moso bamboe, al veel worden toegepast, blijft Guadua bamboe op dat gebied achter. Dit terwijl het betreft sterkte en stijfheid niet onder doet voor Moso. Maar wellicht is het daarom ook minder geschikt voor de producten die nu van Moso bamboe gefabriceerd worden.

Kosten

Om de kosten van gelamineerde bamboeproducten te drukken, zal op een slimme manier om gegaan moeten worden met vooral transport. Door het slanker dimensioneren is het prijsverschil met gelamineerd hout aanzienlijk afgenomen. Een reductie van 35% van de doorsnede voor een in gelamineerde bamboestructuur geeft een directe reductie van de kosten van 35%. Uit hoofdstuk 4.2 is gebleken dat de prijs van gelamineerd bamboe momenteel circa 60 tot 75% duurder is dan gelamineerd hout. Wanneer er rekening gehouden wordt met het feit dat er minder materiaal nodig is bij een bamboestructuur, geeft dit een verschil van 35 tot 40%. Een verschil dat wellicht in de toekomst nog verder gereduceerd kan worden, waardoor bamboe een concurrerend product kan zijn voor hout.

6.2 AANBEVELINGEN

Tijdens dit onderzoek is de nadruk gelegd op de constructieve aspecten. Maar er zijn veel raakvlakken in dit onderzoek die invloed hebben op de onderzoeksvraag of gelamineerd bamboe een concurrerend materiaal kan zijn voor gelamineerd hout. Zeker met het oog op financiële en ecologische kosten is er nog meer inzicht te verkrijgen. Daarom volgen hieronder een aantal aanbevelingen die volgen uit dit onderzoek:

Kosten

- Om inzichtelijk te maken wat de exacte kosten zijn voor gelamineerd bamboe bij het toepassen als constructiemateriaal, zal moeten worden onderzocht wat de mogelijkheden zijn om gelamineerd bamboe vanuit Zuid-Amerika te importeren.
- De mogelijkheden voor bamboeproductie in (Zuid-) Europa. Wanneer bamboe lokaal wordt gebruikt heeft het een aanzienlijk mindere belasting op het milieu, door het wegvallen van zeetransport. Wellicht is het mogelijk om in een warmer, subtropisch, klimaat in het zuiden van Europa productiebossen te realiseren die een groot deel van de transportkosten zowel financieel als ecologisch kunnen beperken.

Sterktetests

- De daadwerkelijke sterkte en stijfheid van zowel Moso bamboe als Guadua bamboe zou volgens de voorgeschreven norm (NEN-EN 408) getest moeten worden. En vervolgens zou er aan de hand van deze tests en de voorgeschreven norm voor het bepalen van karakteristieke waarden (NEN-EN 384), karakteristieke rekenwaarden bepaald moeten worden. Deze zouden dan opgenomen kunnen worden in de norm voor gelamineerde houtconstructies (NEN-EN 14080).
- Er zou onderzoek gedaan kunnen worden naar de te gebruiken lijm om bamboe te verlijmen. Uit de sterktetests in die onderzoek is gebleken dat de lijmverbinding verre van sterk genoeg is om het maximale uit de bamboe te halen.

7 LITERATUURLIJST

Boeken:

Janssen, *Bamboo research at the Eindhoven University of Technology*,

Blass, Aune, Choo, Görlacher, Griffiths, Hilson, Racher, Steck, *Timber Engineering STEP1*, 1995

Blass, Aune, Choo, Görlacher, Griffiths, Hilson, Racher, Steck, *Timber Engineering STEP2*, 1995

Janssen, *Building with Bamboo*, 1981

Porteous & Kermani, *Structural Timber Design to eurocode 5*, 2007

Blaazer, Van Gessel, Glas, Hylkema, Ledderhof, *Bouwproducten*, 2006

Publicaties:

Janssen, *Bamboo in building structures*, 1981

Grosser and Liese, 1971

Koenen, *Bamboe als constructief bouw materiaal*, 2010

SKH, *Beoordelingsgrondslag BGS-005*, Certificatie-instelling SKH, 2014

SKH, *Beoordelingsrichtlijn BRL 1708*, Certificatie-instelling SKH, 2015

United Nations, *The use of bamboo and reeds in building constructions*, 1972

Van den Dobbelsteen & Alberts, *Milieueffecten van bouwmaterialen*, 2001

Van der Lugt, *Design inventions for stimulating Bamboo commercialization*, 2008

Van der Lugt, *Bamboe als alternatief bouw materiaal in West-Europa?*, 2003

Van der Palen, *Een mysterie ontrafeld? Bamboe in bloei*, 1996

Websites:

<http://www.lamboo.us/> bezocht: januari 2016

<http://www.3b-structure.com>, bezocht: januari 2016

<http://www.guaduabamboo.com>, bezocht: januari 2016

<http://www.bambooimport.com>, bezocht: januari 2016

<http://www.bambooteq.com/> Bamboe leverancier

<http://www.solidbamboo.nl/> bezocht: januari 2016

<http://www.moso.eu/nl>, bezocht: januari 2016

<http://www.ecobam.nl>, bezocht: januari 2016

<http://www.bamboobotanicals.ca/html/about-bamboo/bamboo-growth-habits.html>, bezocht: januari 2016

<http://www.lubanhouse.com/over-bamboe>, bezocht: januari 2016

<http://www.bamboogarden.com/Phyllostachys%20edulis%20%20Moso.htm>, bezocht: januari 2016

<http://www.bambooinvitro.com/about-bamboo-in-vitro-costa-rica-tissue-technology-production/mission-and-vision>,
bezocht: januari 2016

<http://www.svensktlimtra.se/no/limHTML/2U231.html>, bezocht: januari 2016

Normen:

NEN-EN 1990-200+NB-2007

NEN-EN_1990+A1+A1_C2_NB_2011

NEN-EN 1991-1-3-2003+NB-2007

NEN-EN_1991-1-3+C1_NB_2011

NEN-EN 1991-1-4-2005+NB-2007

NEN-EN_1991-1-4+A1+C2_NB_2011

NEN-EN 1995-1-1-2005+NB-2007

NEN-EN 1995-1-1+C1+A1_2011_NB_2013

NEN-EN 1995-1-2+C2 2011

BIJLAGEN

Bijlage	Onderdeel
I	Rapport sterktetests
II	Hoofdberekening industriële hal hout
III	Hoofdberekening industriële hal bamboe
IV	Hoofdberekening trainingshal manege hout
V	Detailberekening trainingshal manege hout
VI	Tekeningen trainingshal manege hout
VII	Hoofdberekening trainingshal manege bamboe
VIII	Detailberekening trainingshal manege bamboe
IX	Tekeningen trainingshal manege bamboe