

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:  
bouwkunde

## **Masterthesis**

**Experimentele bepaling van de mechanische eigenschappen van bamboe als vervanger van staal in gewapend beton**

**Dario Mendoza  
Jonas Van Moorsel**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## **PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

## **COPROMOTOR :**

Mevr. Bane IBSA TOLA

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek  
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



**2022**  
**2023**

# Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:  
bouwkunde

## **Masterthesis**

***Experimentele bepaling van de mechanische eigenschappen van bamboe als vervanger van staal in gewapend beton***

**Dario Mendoza**

**Jonas Van Moorsel**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

## **PROMOTOR :**

Prof. dr. ir. Jose GOUVEIA HENRIQUES

## **COPROMOTOR :**

Mevr. Bane IBSA TOLA



**KU LEUVEN**



## Woord vooraf

Deze masterproef vormt het sluitstuk van de opleiding master in de industriële wetenschappen: bouwkunde aan de Universiteit Hasselt. Het bespreekt de experimentele bepaling van de mechanische eigenschappen van bamboe als vervanger van staal in gewapend beton. Tijdens dit onderzoek is niet alleen nieuwe kennis verworven over de implementatie van bamboe in structurele elementen, maar zetten de resultaten ook aan tot toekomstig onderzoek.

Allereerst willen we de promotor prof. dr. Ir. Jose Alexandre Gouveia Henriques bedanken voor zijn professionele assistentie gedurende het academiejaar. Dankzij de begeleiding in de vorm van feedback en theoretische ondersteuning kon deze masterproef succesvol afgerond worden. Bijkomend willen we ook nog specifiek de heer Dan Dragan, dr. ing. Rik Steensels en ing. Tine Engelen bedanken voor hun assistentie bij de voorbereiding en uitvoering van proeven.

Tot slot willen we ook onze familie bedanken voor alle steun tijdens het schrijven van deze masterproef.



# Inhoud

<b>WOORD VOORAF</b> .....	<b>1</b>
<b>LIJST MET TABELLEN</b> .....	<b>5</b>
<b>LIJST MET FIGUREN</b> .....	<b>7</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>9</b>
<b>ABSTRACT IN ENGLISH</b> .....	<b>11</b>
<b>1 INLEIDING</b> .....	<b>13</b>
<b>2 ALGEMENE INFORMATIE</b> .....	<b>15</b>
2.1 KENNISMAKING MET BAMBOE .....	15
2.2 KEUZE BAMBOESOORT .....	17
<b>3 NORMALISATIE</b> .....	<b>19</b>
3.1 HIÉRARCHISCHE STRUCTUUR NORMALISATIE .....	19
3.2 NORMEN VOOR BAMBOE .....	20
3.2.1 Bewaring proefstukken .....	20
3.2.2 Algemene voorwaarden .....	20
3.2.3 Bepaling vochtgehalte .....	20
3.2.4 Bepaling dichtheid .....	21
3.2.5 Druksterkte en stijfheid evenwijdig aan de vezels .....	21
3.2.6 Treksterkte en stijfheid evenwijdig aan de vezels .....	21
3.2.7 Buigsterkte en stijfheid evenwijdig aan de vezels .....	22
3.2.8 Uittreksterkte .....	23
3.3 NORMEN VOOR STAAL .....	23
3.4 NORMEN VOOR HOUT .....	23
<b>4 LITERATUURSTUDIE</b> .....	<b>25</b>
4.1 UITGEVOERDE PROEVEN IN DE LITERATUUR .....	25
4.1.1 Trekproef .....	25
4.1.2 Uittrekproef .....	26
4.1.3 Buigproef .....	29
4.2 DENSITEIT .....	30
4.3 WATERABSORPTIE EN VOCHTGEHALTE .....	30
4.4 BAMBOE OP LANGE TERMIJN .....	31
4.5 BAMBOE VS STAAL .....	32
4.6 FAALMODUS BIJ PROEVEN .....	32
4.6.1 Drukproef .....	32
4.6.2 Trekproef .....	33
4.6.3 Buigproef .....	33
4.7 BEHANDELEN VAN BAMBOE .....	34
4.8 PROEVEN OP BALKEN .....	35
<b>5 MATERIAAL EN METHODEN</b> .....	<b>39</b>
5.1 BEWARING BAMBOESTOKKEN .....	39
5.2 SAMENSTELLING BETONMENGSEL .....	39
5.2.1 Randvoorwaarden .....	39
5.2.2 Keuze betonmengsel .....	39
5.2.3 Controle w/c-factor .....	40

5.2.4	Controle druksterkte .....	41
5.3	KLAARMAKEN PROEFSTUKKEN .....	41
5.3.1	Trialproeven .....	42
5.3.2	Trekproef.....	45
5.3.3	Uittrekproef.....	47
5.3.4	Buigproef.....	49
5.3.5	Densiteit .....	49
5.3.6	Vochtabsorptie.....	50
5.4	UITVOERING PROEVEN.....	50
5.4.1	Uitvoeren trialtest .....	50
5.4.2	Uitvoeren trekproef .....	51
5.4.3	Uitvoeren uittrekproef .....	52
5.4.4	Uitvoeren buigproef.....	53
5.4.5	Uitvoeren proef vochtgehalte .....	53
<b>6</b>	<b>RESULTATEN EN DISCUSSIE .....</b>	<b>55</b>
6.1	DENSITEIT .....	55
6.2	VOCHTABSORPTIE EN DROGING .....	57
6.3	TREKPROEF.....	63
6.3.1	Treksterkte algemeen .....	63
6.3.2	Treksterkte per faalmodus .....	67
6.4	UITTREKPROEF .....	69
6.4.1	Drukproeven beton .....	69
6.4.2	Globale bespreking uittreksterkte.....	71
6.4.3	Gedetailleerde bespreking uittreksterkte .....	73
6.4.4	Bespreking uittreksterkte staalwapening .....	74
6.4.5	Vochtabsorptie door implementatie in beton .....	75
6.4.6	Algemene problematiek:.....	77
6.5	BUIGPROEF .....	79
6.5.1	Buigproef zonder knoop in overspanning.....	79
6.5.2	Buigproef met knoop in overspanning.....	80
6.5.3	Algemeen buigproef met en zonder knoop .....	81
<b>7</b>	<b>ONTDEKKING POTENTIEEL VAN BAMBOE ALS VERVANGER VAN STAALWAPENING.....</b>	<b>83</b>
7.1	THEORETISCHE ACHTERGROND .....	83
7.2	THEORETISCH REKENVOORBEELD.....	84
7.2.1	Bepalen belastingen.....	85
7.2.2	Schatten dimensies .....	85
7.2.3	Corrigeren van $q_{tot}$ inclusief het eigengewicht van de balk .....	86
7.2.4	Bepalen dimensies .....	86
7.2.5	Corrigeren van $q_{tot}$ inclusief het eigengewicht van de balk .....	86
7.2.6	Bepalen wapening (staal).....	86
7.2.7	Bepalen wapening (bamboe) .....	87
<b>8</b>	<b>CONCLUSIE.....</b>	<b>91</b>
	<b>LITERATUURLIJST .....</b>	<b>93</b>
	<b>BIJLAGEN.....</b>	<b>97</b>
	BIJLAGE A: BEREKENEN WAPENING MET BEHULP VAN BAMBOE .....	97

## Lijst met tabellen

Tabel 1: Vergelijking verschillende materiaalsoorten ter productie van 1m <sup>3</sup> .....	13
Tabel 2: Resultaten hechtsterkte met Negrone.....	28
Tabel 3: Verwachte en experimentele waarden van de buigproef.....	29
Tabel 4: Procentuele weergave verschil in waterabsorptie en treksterkte .....	31
Tabel 5: Resultaten buigtesten voor betonnen balk.....	36
Tabel 6: Keuze betonsamenstelling.....	40
Tabel 7: Uitgevoerde proeven .....	42
Tabel 8: Geometrische kenmerken proefstukken trekproef .....	46
Tabel 9: Aantal proeven per variant voor de uittrekproef .....	48
Tabel 10: Parameters trekproef .....	52
Tabel 11: Statistische resultaten densiteit.....	55
Tabel 12: Statistische analyse waterabsorptie .....	58
Tabel 13: Verandering in vochtgehalte per uur .....	62
Tabel 14: Statistische analyse verandering in vochtgehalte .....	62
Tabel 15: Resultaten trekproeven.....	64
Tabel 16: Treksterkte en Young's modulus van staal S500 .....	67
Tabel 17: Resultaten drukproeven.....	69
Tabel 18: Resultaten uittrekproef.....	71
Tabel 19: Verhouding hechtsterkte ten opzichte van de hechtsterkte zonder knoop of verbetering ....	73
Tabel 20: Verhouding hechtsterkte ten opzichte van de hechtsterkte met staalwapening .....	75
Tabel 21: Resultaten droging proefstukken uittrekproef.....	76
Tabel 22: Vergelijking statistische analyse vochtgehalte bij onderdompeling en in beton.....	76
Tabel 23: Gegevens proefstukken buigproef zonder knoop.....	79
Tabel 24: Resultaten buigproef zonder knoop.....	80
Tabel 25: Statistische analyse buigproef zonder knoop .....	80
Tabel 26: Gegevens proefstukken buigproef met knoop.....	80
Tabel 27: Resultaten buigproef met knoop .....	81
Tabel 28: Statistische analyse resultaten buigproef met knoop.....	81
Tabel 29: Resultaten wapeningsberekening staal en bamboe .....	88





## Lijst met figuren

Figuur 1: Bamboestok met knoop .....	15
Figuur 2: Wapeningskorf opgebouwd uit bamboecomposiet.....	15
Figuur 3: <i>Oxytenanthera abyssinica</i> (A.rich) Munro : laagland bamboe .....	17
Figuur 4: <i>Yushania alpina</i> k.Schum : hoogland bamboe.....	17
Figuur 5: Samenvatting beschikbare ISO-normen .....	19
Figuur 6: Uitvoering drukproef volgens NBN ISO 22157.....	21
Figuur 7: Opbouw proefstuk trekproef volgens NBN ISO 22157.....	22
Figuur 8: Uitvoering buigproef volgens NBN ISO 22157 .....	22
Figuur 9: Schets proefopstelling trekproeven.....	26
Figuur 10: Proefopstelling uittrekproef.....	27
Figuur 11: Bamboe omwikkeld met een staaldraad .....	28
Figuur 12: Vierpuntsbuigproef met (a) situatieschets; (b) krachtverloop; (c) momentenverloop.....	29
Figuur 13: Uitvoering buigproef op bamboestrips met een verschillende oriëntatie .....	34
Figuur 14: Hulpstukken ter inklemming van de proefstukken .....	42
Figuur 15: Proefstukken gevuld met epoxy.....	43
Figuur 16: Uitwendige cilinder van epoxy rond proefstuk .....	44
Figuur 17: Proefstuk versterkt met staaldraad.....	44
Figuur 18: Proefstuk met geboorde gaten .....	44
Figuur 19: Gebruikte centerpons om de bamboestokken te splijten .....	45
Figuur 20: Opbouw proefstuk trekproef volgens NBN ISO 22157.....	46
Figuur 21: Proefstukken trekproef .....	46
Figuur 22: Proefstuk uittrekproef zonder knoop in het beton .....	47
Figuur 23: Plaat ter ondersteuning bamboestokken tijdens uitharden beton.....	48
Figuur 24: Schets proefopstelling trekproef.....	51
Figuur 25: Proefopstelling trekproef labo .....	51
Figuur 26: Platte grips voor bamboestrips.....	52
Figuur 27: V-vormige grips voor staalwapening.....	52
Figuur 28: Proefopstelling uittrekproef labo .....	52
Figuur 29: Proefopstelling buigproef labo .....	53
Figuur 30: Proefstukken vochtabsorptie in een waterbak .....	54
Figuur 31: Berekende densiteit per stok.....	55
Figuur 32: Spreidingsdiagram resultaten densiteit.....	56
Figuur 33: Evolutie vochtabsorptie van ondergedompelde proefstukken .....	57
Figuur 34: Evolutie vochtabsorptie proefstukken zonder knoop.....	58
Figuur 35: Evolutie vochtabsorptie proefstukken met 1 knoop .....	59
Figuur 36: Evolutie vochtabsorptie proefstukken met 2 knopen.....	59
Figuur 37: Proefstuk UW1, UW2 en UW3 .....	60
Figuur 38: Proefstuk QW21, QW22, RW23 en RW24 .....	60
Figuur 39: Doorsnede proefstuk QW21, QW22, RW23 en RW24 .....	60
Figuur 40: Droging proefstukken op kamertemperatuur .....	61
Figuur 41: Vochtabsorptie bij kamertemperatuur .....	62
Figuur 42: Vergelijking adsorptie en desorptie per uur, per type van proefstukken .....	63
Figuur 43: Resultaten trekproef.....	64
Figuur 44: Vergelijking gemiddelde treksterkte per stok met resultaten uit de literatuur.....	65
Figuur 45: Falen van bamboestrip aan inklemming grip.....	66
Figuur 46: Longitudinaal falen van de bamboestrip.....	66
Figuur 47: Relatie tussen treksterkte en densiteit.....	66

Figuur 48: Vergelijking trekproef op staal en literatuur.....	67
Figuur 49: Treksterkte bij faalmodus buitenoppervlak grip.....	67
Figuur 50: Spanning – rek diagram staal.....	68
Figuur 51: Treksterkte bij faalmodus binnenoppervlak grip.....	68
Figuur 52: Treksterkte bij faalmodus longitudinaal .....	68
Figuur 53: Vergelijking resultaten druksterkte met de verwachte sterkte .....	70
Figuur 54: Vergelijking resultaten uittrekproef met resultaten uit de literatuur.....	72
Figuur 55: Resultaat uittrekproef zonder knoop.....	73
Figuur 56: Resultaat uittrekproef met knoop.....	73
Figuur 57: Resultaat uittrekproef zonder knoop en met bitumen .....	73
Figuur 58: Resultaat uittrekproef zonder knoop en met bitumen en zand.....	73
Figuur 59: Resultaat uittrekproef met wapeningsstaal $\varnothing 10$ .....	73
Figuur 60: Uitgerokken staven tijdens uittrekproef.....	75
Figuur 61: Aantasting proefstukken na implementatie in beton 1.....	76
Figuur 62: Aantasting proefstukken na implementatie in beton 2.....	76
Figuur 63: Verschil in opbouw tussen bamboestok en knoop.....	76
Figuur 64: Resultaten buigproef zonder knoop .....	79
Figuur 65: Splitsing proefstukken in de langsrichting .....	80
Figuur 66: Resultaten buigproef met knoop.....	81
Figuur 67: Falen van de knopen bij buigproef .....	81
Figuur 68: Buigspanning proefstukken met en zonder knoop.....	82
Figuur 69: Wapeningsstaaf BE500.....	83
Figuur 70: Overspanning theoretisch rekenvoorbeeld .....	84
Figuur 71: Vloeropbouw theoretisch rekenvoorbeeld.....	84
Figuur 72: Verdeelde belasting op een isostatische ligger op 2 steunpunten .....	85

## Abstract

Universiteit Hasselt en Jimma University onderzoeken de mogelijkheid om bamboe te gebruiken als vervanger van wapeningsstaal in gewapend beton. Door de lokale aanwezigheid van bamboe in ontwikkelingslanden kan dit materiaal als goedkopere variant in structurele elementen van laagbouw gebruikt worden. Deze masterproef focust op het karakteriseren van de mechanische eigenschappen van *Arundinaria amabilis* (Tonkin). Tot slot wordt een theoretisch rekenvoorbeeld uitgewerkt om een equivalente hoeveelheid aan bamboe te berekenen ter vervanging van wapeningsstaal in een betonnen balk.

Om de mechanische eigenschappen van Tonkin te bepalen werden een trekproef, buigproef en uittrekproef uitgevoerd en werden de vochtabsorptie en dichtheid van het materiaal experimenteel bepaald. De proeven zijn uitgevoerd volgens NBN ISO 22157 met uitzondering van de uittrekproef. Om de uittreksterkte te bepalen zijn methodes uit de literatuur gevolgd door afwezigheid van normeringen.

De resultaten van de experimentele proeven stemmen overeen met de geraadpleegde literatuur. Zo bedraagt de gemiddelde treksterkte 136 MPa, buigsterkte 82,6 MPa en dichtheid 746 kg/m<sup>3</sup>. Tot slot bedraagt de uittreksterkte 1,01 MPa na behandeling met vloeibare bitumen en besprenkeling met zand. Op basis van het theoretisch rekenvoorbeeld is er 4,1 keer meer bamboe nodig ten opzichte van staal om te voldoen aan de benodigde sterkte. Algemeen kan geconcludeerd worden dat *Arundinaria amabilis* (Tonkin) een potentiële vervanger is voor staalwapening voor gebruik in laagbouw.



## Abstract in English

Hasselt University and Jimma University are studying the possibility of using bamboo as a substitute for reinforced steel in concrete. Bamboo can be used as a more economical alternative for reinforced structural elements of low-rise structures due to the local presence of this material in developing countries. This master's thesis focuses on determining the mechanical properties of *Arundinaria amabilis* (Tonkin). Finally, a theoretical calculation example is worked out to calculate an equivalent amount of bamboo in order to replace steel reinforcement in a concrete beam.

To determine the mechanical properties of Tonkin, a tensile test, bending test and pull-out test were performed and the moisture absorption and density of the material were determined experimentally. The tests were performed according to NBN ISO 22157 with the exception of the pull-out test. To determine the pull-out strength, methods from the literature were followed in the absence of norms.

The results of the experimental tests correspond to the consulted literature. The average tensile strength is 136 MPa, bending strength 82,6 MPa and density 746 kg/m<sup>3</sup>. Finally, the pull-out strength is 1,01 MPa after treatment with liquid bitumen and sprinkling with sand. Based on the results of the theoretical calculation, 4,1 times more bamboo is required in comparison with steel in order to achieve structural stability. Generally, it can be concluded that *Arundinaria amabilis* (Tonkin) is a potential substitute for steel reinforcement for use in low-rise structures.



# 1 Inleiding

Bamboe is vanuit ecologisch standpunt een potentiële vervanger voor staalwapening. Bij de productie van bamboe komt minder CO<sub>2</sub> vrij waardoor dit aansluit bij de huidige samenevingsideologie waarbij alle sectoren de uitstoot van CO<sub>2</sub> moeten reduceren om op deze manier de opwarming van de aarde tegen te gaan. Bijkomend sluit dit ook aan bij de actuele prijsstijgingen. Aangezien bamboe een natuurlijk materiaal is, is het veel minder arbeidsintensief om dit materiaal te produceren ten opzichte van staal [1]. Dit wordt geïllustreerd in Tabel 1.

Tabel 1: Vergelijking verschillende materiaalsoorten ter productie van 1m<sup>3</sup> [1, p. 1500]

Building material	Modulus of elasticity (MPa)	Working stress (MPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Efficiency for stiffness	Efficiency for strength	Energy of production (MJ/kg)	Energy of production (MJ/m <sup>3</sup> )	Energy per unit stress
	A	B	C	$D = A / C$	$E = B / C$	F	$G = F * C$	$H = G / B$
Steel	210,000	160	7800	27	0.02	30	234,000	1500
Concrete	25,000	8	2400	10	0.003	0.8	1920	240
Timber	11,000	7.5	600	18	0.013	1	600	80
Bamboe	20,000	10	600	33	0.017	0.5	300	30

In Tabel 1 is zichtbaar dat voor de productie van 1 m<sup>3</sup> bamboe 780 keer minder energie vergt in vergelijking met de productie van 1 m<sup>3</sup> staal. Tabel 1 geeft ook de verhouding van de nodige energie per spanningseenheid weer. Hieruit valt te concluderen dat bamboe 50 keer minder energie vraagt per spanningseenheid ten opzichte van staal. Ondanks dat bamboe minder sterke mechanische eigenschappen vertoont ten opzichte van staal, vertoont het betere resultaten wanneer er wordt gefocust op de hoeveelheid energie die nodig is voor de productie van 1 m<sup>3</sup> materiaal.

Wereldwijd bestaan er meer dan 1500 soorten bamboe waarvan het grootste deel gevonden kan worden in Azië. Van al deze soorten zijn er slechts ongeveer 40 soorten die in Afrika groeien. De aanwezige oppervlakte waarop bamboe groeit in Ethiopië wordt geschat op ongeveer 1 miljoen hectare. Dit bedraagt zo'n 67% van heel de oppervlakte aan bamboe die groeit in Afrika en 7% van het wereldtotaal (2003) [2].

Buiten het feit dat bamboe in grote mate aanwezig is, beschikt het ook over een snelle groei- en oogstcyclus. De meeste bamboesoorten bereiken hun maximale hoogte en diameter tussen de drie en zeven jaar. Echter wordt de maximale sterkte reeds na twee à drie jaar bereikt. Hierdoor zijn ze vanaf dit moment al klaar voor gebruik.

In landen waarin bamboe in grote mate beschikbaar is (bv. India, Ethiopië, China, enz.), heeft het zijn potentieel als structureel bouw materiaal reeds bewezen. Ondanks dat bamboe reeds gebruikt wordt als bouw materiaal, is de implementatie als wapening in beton een volkomen nieuw gegeven. Er bestaat een mogelijkheid om staalwapening te vervangen door een goedkoper en lokaal beschikbaar materiaal zoals bamboe bij toepassingen waarbij de optredende belastingen laag tot middelhoog zijn. Door bamboe aan te wenden als wapening, kan de kostprijs van woningen gereduceerd worden. Hierdoor kan het bedrag dat niet aan wapening besteed wordt, gebruikt worden om de kwaliteit van de woning additioneel te



verbeteren. Op basis van dit gegeven kan de levensstandaard in ontwikkelingslanden verbeterd worden zonder bijkomende budgetten te voorzien.

Deze masterproef staat in het teken van een samenwerking tussen de UHasselt en de Jimma University te Ethiopië binnen het kader van “Network for Advancement of Sustainable Capacity in Education and Research in Ethiopia” (NASCERE) van de “Vlaamse Interuniversitaire Raad - Universitaire Ontwikkelingssamenwerking” (VLIR-UOS). Deze masterproef dient een aanvulling te zijn op het doctoraatsonderzoek van PhD student Bane Ibsa Tola aan de Jimma University (Ethiopië). Binnen dit onderzoek wordt er gewerkt met de enige twee bamboesoorten die van natuurlijke oorsprong beschikbaar zijn in Ethiopië, namelijk, hoog- en laaglandbamboe.

Laaglandbamboe is in de grootste mate aanwezig in Ethiopië. 85% van alle bamboeplanten die in Ethiopië terug te vinden zijn, worden door deze soort in gekenmerkt. Dit type bamboe is rond de vijf centimeter breed en kan groeien tot een hoogte van ongeveer zeven meter. Laaglandbamboe groeit op hoogtes van 500-1800 meter boven de zeespiegel. Hooglandbamboe, de variant die tussen 2400-3500 meter boven de zeespiegel groeit, is rond de acht centimeter breed en kan tot zeventien meter hoog worden.

Het doel van deze masterproef is een eerste kennismaking maken met het materiaal bamboe en onderzoek voeren naar de aanwezige normen in verband met de karakterisatie van mechanische eigenschappen, rekenmechanismen en faalmechanismen om in een later stadia deze informatie te kunnen gebruiken om bamboe aan te wenden als mogelijke vervanger van staal in gewapend beton.

Binnen deze masterproef wordt er allereerst een eerste kennismaking gemaakt met het materiaal bamboe. Hierna worden de testmethoden en opmerkingen voor het bepalen van de mechanische en fysische eigenschappen volgens NBN ISO 22157 besproken. Vervolgens wordt er een literatuurstudie uitgevoerd, die op zijn beurt gevolgd wordt door materiaal en methoden. Hierna worden de resultaten van de uitgevoerde proeven besproken waarna er afgesloten wordt met een theoretisch rekenvoorbeeld om te concluderen of bamboe over potentieel beschikt om staalwapening te vervangen.

## 2 Algemene informatie

### 2.1 Kennismaking met bamboe

Eén van de vaak voorkomende fouten die in de spreektaal gemaakt worden is dat men spreekt over boom- of houtsoorten. Dit gegeven is echter foutief aangezien bamboe een grassoort is die behoort tot de familie van *Bambusoideae*. Uitwendig bestaat bamboe uit een aaneenschakeling van aanwezige knopen met tussenin relatief gladde zones. Figuur 1 toont een afbeelding van een bamboestok met de aanwezigheid van een knoop.



Figuur 1: Bamboestok met knoop

Figuur 1 toont een beeld van een bamboestok van de soort Tonkin, die gebruikt is in het kader van deze masterproef. Stokken zijn niet de enige vorm waarin bamboe gebruikt wordt in de praktijk. Zo worden er ook bamboecomposieten gemaakt in de vorm van gelijmd gelamineerde lamellen naar analogie met het gelijmd gelamineerd hout, ook wel bekend onder de vorm *glued laminated timber* (Glulam). Met behulp van deze gelijmde lamellen is het mogelijk om atypische vormen te creëren die niet mogelijk zijn met behulp van volledige stokken. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om een wapeningskorf te construeren zonder gebruik te maken van externe verbindingsmiddelen. Een voorbeeld hiervan wordt geïllustreerd in Figuur 2.



Figuur 2: Wapeningskorf opgebouwd uit bamboecomposiet [3, p. 696]

Verwerking van bamboestokken tot lamellen heeft als voordeel dat er grotere sterktes behaald kunnen worden. Zo zijn de mechanische sterkte-eigenschappen van bamboelammellen beter dan die van zachthout en zelfs vergelijkbaar met die van hardhout. Tot slot is het zelfs mogelijk om met behulp van de correcte samenstelling om in de buurt te komen van de sterkte van teakhout, wat één van de sterkste houtsoorten is [4].

De doorsnede van een bamboestok bestaat niet uit één soort materie. Zo is de doorsnede opgebouwd uit lange evenwijdige cellulosevezels die ingebed zijn in een sponsachtige matrix. Door de aanwezigheid van deze cellulosevezels is de dichtheid van de doorsnede niet constant maar eerder variabel in de dikte [5]. Buiten de aanwezigheid van cellulosevezels zorgt de natuurlijke vorm van het groeien ook voor variaties in de wanddikte. Zo zal de uitwendige diameter van de bamboestok van onder naar boven afnemen waardoor de wanddikte bijgevolg ook afneemt [6]. Dit gegeven is belangrijk om mee te nemen

tijdens het voorbereiden van de proefstukken aangezien variaties in de dikte mogelijk ook de sterkte-eigenschappen beïnvloeden.

Tijdens de levenscyclus beschikt bamboe niet constant over dezelfde sterkte. Zo neemt de sterkte toe naarmate het ouder wordt. De toename in sterkte is echter eindig waarbij de optimale leeftijd voor het bereiken van de maximale sterkte zich bevindt tussen 2,5 en 4 jaar. Na het bereiken van deze leeftijd neemt de sterkte terug af [7].

Het materiaal bamboe toont verschillende gelijkenissen met hout. Zo is bamboe net zoals hout een orthotroop materiaal [5]. Dit wil zeggen dat de materiaaleigenschappen verschillend zijn in twee of drie onderlinge loodrechte richtingen. Zo heeft bamboe naar analogie met hout hogere mechanische eigenschappen volgens de vezelrichting in vergelijking met de dwarsrichting [8]. Bijkomend zijn ook de expansiecoëfficiënten verschillend per richting zoals bij hout. Zo bedraagt de horizontale expansie bij verandering van vochtgehalte 2% tot 5% terwijl deze voor de longitudinale slechts 0,05% bedraagt [9].

Net als bij hout zorgen de aanwezige knopen voor een afwijking van de algemene sterkte. Omwille van deze reden is het belangrijk dat er bij de uitvoering van proeven specifiek rekening gehouden wordt met de invloed hiervan

Naar analogie met andere bouwmaterialen zoals hout, staal, bakstenen, enz. beschikt bamboe eveneens over zowel voor- als nadelen. Onderstaande opsommingen geven voorbeelden van zowel voor- als nadelen.

Voordelen:

- bamboe kan toegepast worden in dragende toepassingen (vb: balken, kolommen, bruggen, ...);
- bamboe is beschikbaar in grote hoeveelheden;
- bamboe is duurzaam en milieuvriendelijk;
- bamboe groeit snel;
- bamboe is goedkoper doordat het geen arbeidsintensief productieproces doorloopt;
- bamboe heeft hoge parallelle vezelsterkte;
- bamboe heeft antibacteriële eigenschappen;
- bamboe vertoont een kleine rek.

Nadelen:

- bamboe kan besmet zijn door houtboorders (insecten die hout / bamboe opeten);
- bamboe moet droog worden bewaard of behandeld worden met bewaarmiddelen;
- bamboe neemt vocht op en is gevoelig voor warmte, licht en ultraviolette straling. Blootstelling aan deze elementen zorgt voor verzwakking van de eigenschappen.

## 2.2 Keuze bamboesoort

Oorspronkelijk werd geopteerd om dezelfde bamboesoorten te gebruiken als deze die aanwezig zijn in Ethiopië. Er groeien slechts twee bamboesoorten in Ethiopië en beide zijn endemisch voor Afrika, namelijk *Oxytenanthera abyssinica* (A.rich) Munro wat laagland bamboe is en *Yushania alpina* k.Schum wat hoogland bamboe is. Figuur 3 en 4 geven weer hoe deze eruitzien.



Figuur 3: *Oxytenanthera abyssinica* (A.rich) Munro : laagland bamboe [10, p.17]



Figuur 4: *Yushania alpina* k.Schum : hoogland bamboe [11, p. 6]

Deze bamboesoorten komen volgroeid enkel voor in grote diameters (>40 mm) waardoor deze echter niet gewenst is om als wapening te gebruiken in beton.

Verder had ook geen enkele importeur in België of buurlanden deze bamboesoorten ter beschikking. Hierdoor moest er naar alternatieve bamboesoorten gezocht worden. Op basis van dit gegeven is er gezocht naar bamboesoorten met gelijkaardige mechanische eigenschappen en beschikbaarheid in kleine diameters.

Dit heeft geleid tot de beslissing voor de aankoop en het gebruik van de bamboesoort *Arundinaria amabilis*, ook wel bekend onder de naam 'Tonkin'. Deze bamboestokken worden reeds gebruikt als ondersteuning om planten recht te laten groeien en komen voor in kleine diameters. De sterkte van deze soort is te wijten aan de grote hoeveelheid aan verticale vezels in de longitudinale richting [12].

Omwille van de goede eigenschappen en beschikbaarheid in kleine diameters is deze soort een geschikte keuze voor het onderzoek binnen deze masterproef. Specifiek zal er gewerkt worden met stokken waarvan de diameter varieert tussen de 8 en 12 millimeter.

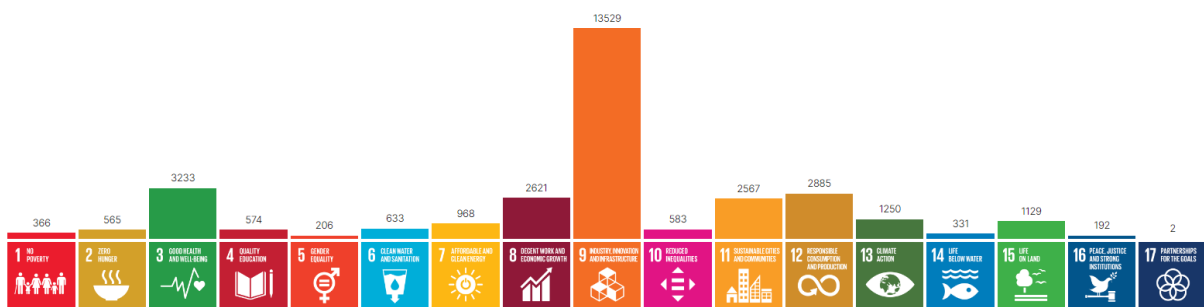


## 3 Normalisatie

### 3.1 Hiërarchische structuur normalisatie

De meest bekende normen in de praktijk zijn de ISO-normen waarbij ISO staat voor International Organisation for Standardization. Dit is een “onafhankelijk, niet gouvernementeel internationale organisatie die samenwerkt met wereldwijde leden om samen met experts kennis te delen en vrijwillig, op consensus gebaseerde, marktrelevante internationale normen te ontwikkelen die innovatie ondersteunen en oplossingen bieden voor wereldwijde uitdagingen” [13].

Zoals blijkt uit bovenstaande beschrijving gaat de focus van ISO-normering veel breder dan enkel de toepassing op bouwmaterialen. Figuur 5 geeft een overzicht van alle beschikbare normen die door de ISO geschreven zijn.



Figuur 5: Samenvatting beschikbare ISO-normen [14]

Uit Figuur 5 volgt dat het grootste deel van alle normen behoort tot categorie 9 ‘Industry, innovation and infrastructure’. Hieronder vallen onder andere de normen die behoren tot de materialen staal, beton, hout, enz.

Gedurende de opleiding industriële wetenschappen is er echter niet gewerkt met de ISO, maar wel met EN-normen. De afkorting EN staat voor ‘Norme Européen / Europese Norm’. De normen die tot stand komen worden geschreven door het CEN oftewel ‘Comité Européen de Normalisation’. Bijkomend is het belangrijk om te vermelden dat normen altijd gebaseerd moeten worden door een overkoepelend orgaan dat voor iedereen geldig is. Dit is een belangrijk gegeven omdat iedere persoon of organisatie zelf normen zou kunnen opstellen en bijgevolg niet met andere vergeleken kunnen worden wegens andere aannames of andere uitvoeringsmethodes.

Ten slotte mogen landen die aangesloten zijn bij de CEN ook nog de EN-normen aanpassen naar hun eigen voorkeuren of idealisatie zonder de eerder gestelde voorwaarden voorgesteld door de overkoepelende EN en ISO norm te schaden. Zo worden de Belgische bronnen gebaseerd op de beschikbare EN-normen en worden deze NBN-normen genoemd. Deze worden door het ‘Bureau de Normalisation’ opgesteld, dewelke een Belgische overheidsinstantie is.

Samenvattend volgt hieruit dus dat hoe lokaler een bron gevolgd wordt, des te strenger de norm zelf is doordat deze steeds verder moet bouwen op zijn overkoepelende norm. Visueel geeft dit van minst streng tot het meest streng:

$$\text{ISO} < \text{EN} < \text{NBN}$$

## 3.2 Normen voor bamboe

Opvallend voor het materiaal bamboe, is dat er weinig Belgische normen beschikbaar zijn ten opzichte van materialen zoals staal, hout, beton, enz. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat bamboe zelden tot nooit gebruikt wordt voor commerciële constructieve functies in onze streek, waardoor het ook niet noodzakelijk is om hier specifieke normen voor te ontwikkelen. De beschikbare NBN normen kunnen geraadpleegd worden in de volgende opsomming:

- NBN ISO 19624:2021 - Basisprincipes en procedures voor het sorteren van bamboehalmen;
- NBN ISO 22156:2021 - Constructief ontwerp bamboestructuren – bamboehalmen;
- NBN ISO 22157:2019 - Bepalen van de fysische en mechanische eigenschappen van bamboestokken – testmethoden;
- NBN ISO 23478:2023 - Beproevingmethoden voor het bepalen van fysische en mechanische eigenschappen van geconstrueerde bamboeproducten.

NBN ISO 22157 is de Belgische norm voor de bepaling van de mechanische en fysieke eigenschappen van bamboe. Er wordt verondersteld dat de lezer van deze masterproef weinig tot geen kennis heeft over deze norm. Hierdoor worden de belangrijkste elementen uit deze norm aangehaald en beschreven worden binnen dit hoofdstuk.

### 3.2.1 Bewaring proefstukken

De bamboestokken die later gebruikt zullen worden als proefstukken moeten opgeslagen worden in een ruimte die verhindert dat zonlicht, regen, grond en stilstaand water in contact komen met de opgeslagen stokken. Bijkomend moet er ook voldoende ventilatie voorzien zijn zodat het vochtgehalte in de opslagruimte, en zo ook elke stok, gelijk blijft [15].

Voorafgaand aan de beproevingen is het belangrijk dat de proefstukken aan een constante temperatuur en vochtigheid blootgesteld worden. Deze temperatuur en vochtigheid bedragen respectievelijk  $(23 \pm 3)^{\circ}\text{C}$  en  $(65 \pm 5)\%$  [15].

### 3.2.2 Algemene voorwaarden

Bij de bepaling van de karakteristieke eigenschappen is het belangrijk dat deze met voldoende zekerheid bepaald worden. Om een zekerheid van 75% op de resultaten te bekomen schrijft de norm voor dat het aangeraden is om minstens 30 proefstukken te testen. Omwille van de beschikbare tijd in het labo en budgettaire redenen is het niet mogelijk om aan deze aanbeveling te voldoen [15].

Verder moet het vochtgehalte van proefstukken bij aanvang van de testen  $(12 \pm 3)\%$  bedragen [15].

### 3.2.3 Bepaling vochtgehalte

Het vochtgehalte van proefstukken wordt zo snel mogelijk bepaald na afloop van de mechanische testen. Hiervoor horen de proefstukken in een droogoven bij een temperatuur van  $(103 \pm 2)^{\circ}\text{C}$  gestoken te worden. Na minstens 24 uur en dienen de proefstukken gewogen te worden tot al het vocht verdampt is. De proefstukken moeten op regelmatige tijdsintervallen van minstens twee uur gewogen worden totdat het verschil in massa tussen twee opeenvolgende metingen niet meer dan 0.5% bedraagt [15].

### 3.2.4 Bepaling dichtheid

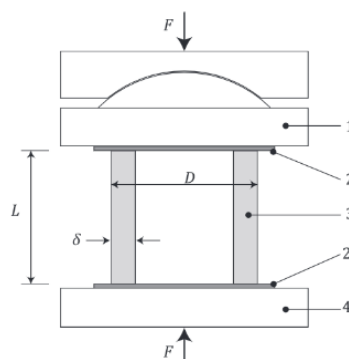
De dichtheid wordt gemeten bij een vochtgehalte van 12% om vergelijking tussen verschillende soorten bamboe mogelijk te maken. Echter mag er voor wetenschappelijke doeleinden gewerkt worden met de droogovenmassa en het volume van het proefstuk om vergelijking tussen resultaten mogelijk te maken zonder dat er rekening gehouden moet worden met mogelijk afwijkende omgevingsomstandigheden [15].

### 3.2.5 Druksterkte en stijfheid evenwijdig aan de vezels

Volgens NBN ISO 22157 is het noodzakelijk dat 50% van de proefstukken een knoop hebben en 50% geen knoop. De norm stelt ook enkele geometrische eisen op waaraan de proefstukken moeten voldoen vooraleer deze beproefd mogen worden. Zo moet de lengte  $L$  kleiner zijn dan de buitendiameter  $D$  of tien keer de dikte  $\delta$ . Voor smalle proefstukken geldt deze regel niet. In dit geval moet de lengte gelijk zijn aan 2 keer de buitendiameter ( $2 \cdot D$ ).

De uiteinden van het proefstuk moeten plat en evenwijdig zijn aan elkaar en loodrecht op de vezelrichting staan [15].

De belasting mag niet zomaar aangebracht worden op het proefstuk. Het is volgens de norm verplicht dat de belasting bij minstens één van de twee eindplaten verdeeld moet worden door een bolvormige lager zoals zichtbaar in Figuur 6 [15].



#### Key

- $D$  outer diameter
- $\delta$  wall thickness
- $F$  load
- $L$  length of specimen ( $L$  is the lesser of  $D$  or  $10\delta$ . If  $D < 20$  mm,  $L = 2D$ )
- 1 upper loading platen with spherical bearing
- 2 intermediate layer
- 3 bamboo specimen
- 4 intermediate layer
- 5 lower loading platen

Figuur 6: Uitvoering drukproef volgens NBN ISO 22157 [15, p. 12]

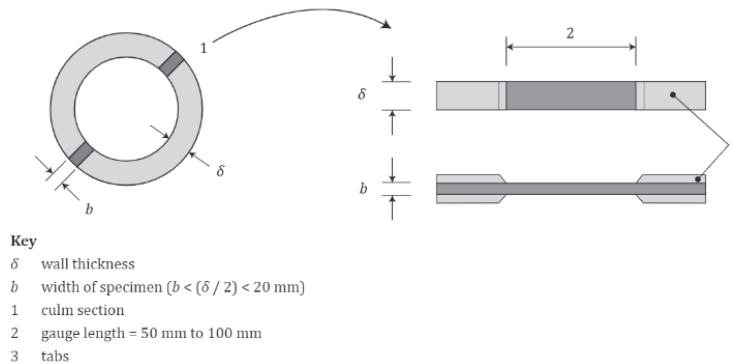
### 3.2.6 Treksterkte en stijfheid evenwijdig aan de vezels

Voor de trekproef wordt in de norm NBN ISO 22157 geen onderscheid gemaakt tussen proefstukken met of zonder knoop. Voor deze masterproef wordt echter beslist dat er wel een onderscheid gemaakt wordt tussen de aan- of afwezigheid van een knoop. Door dit onderscheid kan er achteraf eventueel een verschil in sterkte waargenomen worden. De proefprocedure voor beide reeksen blijft echter identiek [15].



Voor de test is het verplicht om per stok drie proefstukken te nemen om statistisch een nauwkeurigere waarde voor de treksterkte van de stok te verkrijgen. Bijkomend dient dit ook om variabiliteit in sterkte binnen één stok te vermijden [15].

Net zoals bij de drukproef stelt de norm ook bij de trekproef enkele geometrische eisen waaraan de proefstukken moeten voldoen. Figuur 7 geeft weer hoe een proefstuk er moet uitzien voor de trektest volgens norm NBN ISO 22157 [15].

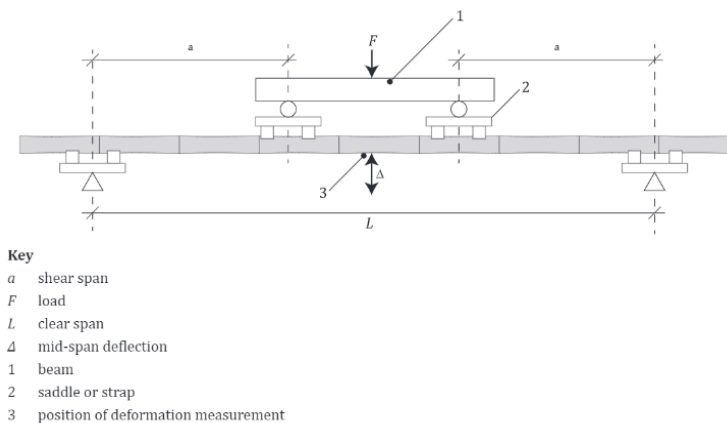


Figuur 7: Opbouw proefstuk trekproef volgens NBN ISO 22157 [15, p. 14]

Voor de trekproef moet de breedte  $b$  van het proefstuk kleiner zijn dan de helft van de wanddikte  $\delta$ , en kleiner zijn dan 20 mm. De vrije lengte tussen de ingeklemde uiteinden moet liggen tussen de 50 en 100 mm. Ter hoogte van de ingeklemde uiteinden worden er *tabs* voorzien om ervoor te zorgen dat het falen van het materiaal gebeurt in de vrije lengte. Deze tabs bestaan uit zachthout of gelijkwaardig materiaal. Bij inklemming van de uiteinden moet er gecontroleerd worden of de drukkracht loodrecht op de vezelrichting van het proefstuk niet overschreden wordt [15].

### 3.2.7 Buigsterkte en stijfheid evenwijdig aan de vezels

Volgens NBN ISO 22157 moet de buigsterkte bepaald worden met een vierpuntsbuigproef in plaats van een driepuntsbuigproef. Net zoals bij de druk- en trekproef stelt de norm weer geometrische eisen op voor de beproeving van proefstukken. Figuur 8 geeft de opstelling weer van de buigproef [15].



Figuur 8: Uitvoering buigproef volgens NBN ISO 22157 [15, p. 16]

Voor de buigproef moet de lengte tussen het steunpunt en het dichtstbijzijnde belastingspunt minstens tien keer de buitendiameter  $D$  bedragen. Voor de afstand tussen beide belastingspunten moet de afstand minstens tien keer de buitendiameter  $D$  bedragen. Aangezien het verplicht is om een vierpuntsbuigproef

uit te voeren volgt er hieruit dat de totale lengte van de staaf minstens 30 keer de buitendiameter  $D$  moet bedragen [15].

Bijkomend moet er ook vermeld worden dat, afhankelijk van de faalmodus, het resultaat wel of niet opgenomen mag worden voor de berekeningen. Indien het proefstuk faalt tussen de belastingspunten mag het resultaat gebruikt worden voor de berekening van de buigsterkte en stijfheid. Indien het proefstuk faalt ter hoogte van de oplegpunten waarbij de oorzaak te wijten is aan afschuiving of een combinatie van afschuiving en buiging dan mag het resultaat niet gebruikt worden voor de berekening van de buigsterkte, maar wel voor de berekening van de stijfheid [15].

### 3.2.8 Uittreksterkte

In het geval van de uittreksterkte zijn er geen voorwaarden aanwezig in de normen die gevolgd moeten worden. In het kader van deze masterproef heeft de bepaling van de uittreksterkte een belangrijke waarde aangezien Tonkin in beton geïmplementeerd wordt. Voor het later gebruik in betonbalken is het noodzakelijk om de grootte van de adhesie tussen beide materialen te kennen. Om de proef zo universeel mogelijk te maken wordt deze uitgevoerd op basis van gehanteerde methodes in de literatuur. Door deze methodes zo accuraat en volledig mogelijk te volgen is het achteraf ook mogelijk om de proefresultaten ook te vergelijken met deze van de literatuur.

## 3.3 Normen voor staal

Staal wordt al decennialang gebruikt waardoor er bijgevolg ook een grote hoeveelheid aan normen geschreven zijn voor het berekenen en beproeven van dit materiaal. Constructieve normen kunnen geraadpleegd worden via Eurocode 3. Voor normatieve testen wordt er verwezen naar de databank van NBN.

## 3.4 Normen voor hout

Net zoals staal wordt hout ook al decennialang gebruikt en zijn er opmerkelijk veel richtlijnen geschreven voor het gebruik en beproeven van dit materiaal. Constructieve normen kunnen geraadpleegd worden via Eurocode 5. Voor normatieve testen wordt er verwezen naar de databank van NBN.



## 4 Literatuurstudie

Binnen deze masterproef worden de karakteristieke eigenschappen van *Arundinaria amabilis* (Tonkin) experimenteel onderzocht. Hiervoor worden drie destructieve proefmethoden voorgesteld. Deze zijn de trekproef, uittrekproef en buigproef.

Voorafgaand aan de experimentele testen wordt er informatie uit papers verzameld om een impressie te verkrijgen over de sterkte van bamboe, welke problemen kunnen optreden, welke variabelen de resultaten positief / negatief beïnvloeden, enz.

De drukproef is in het kader van deze masterproef niet fysiek uitgevoerd als gevolg van machinale beperkingen. De beschikbare machines zijn ontworpen voor het bepalen van betoneigenschappen waardoor deze niet over de mogelijkheid beschikken om nauwkeurige resultaten te bieden aan lage krachten.

### 4.1 Uitgevoerde proeven in de literatuur

In de literatuur zijn reeds tal van proeven uitgevoerd ter bepaling van de mechanische eigenschappen van bamboe. De globale trend die opvalt bij de resultaten is de variabiliteit op de resultaten. Naar analogie met hout zijn de mechanische eigenschappen van bamboe afhankelijk van de soort die beschouwd wordt.

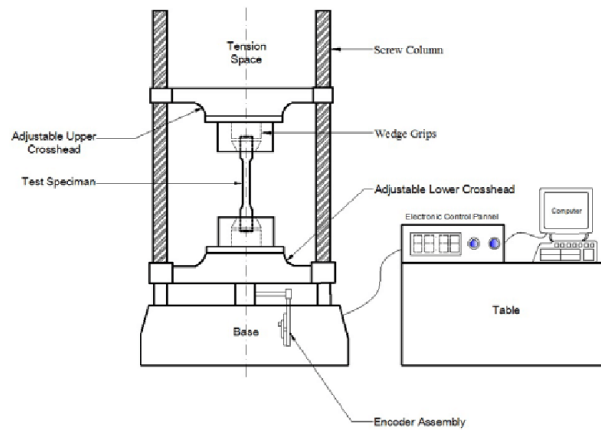
In onderstaande hoofdstukken worden de eigenschappen van Tonkin en soortgelijke varianten besproken om een beeld te krijgen van de grootteorde van de sterkte.

#### 4.1.1 Trekproef

Er zijn reeds testen uitgevoerd op Tonkin om de sterkte en de eigenschappen van Tonkin in kaart te brengen. Zo heeft onderzoek aangetoond dat Tonkin een gemiddelde treksterkte van 84,7 MPa behaalt bij de knopen en 123,7 MPa in het gedeelte zonder knoop [16]. De Tonkin in de proeven heeft een elasticiteitsmodulus (E-modulus) van  $(17,6 \pm 1,4)$  GPa.

Verder is er ook onderzoek gedaan door [17] op de bamboesoort *Phyllostachys*. Zo wordt verkregen, uit proeven op proefstukken met diameter 95,5 à 111,4 mm bij een vochtgehalte van 12 à 15%, dat de *Phyllostachys* een gemiddelde longitudinale treksterkte behaalt van 144,81 MPa en een dwarse / transversale treksterkte van 4,66 MPa. De elasticiteitsmodulus bedraagt 16,57 GPa, wat ongeveer een factor 10 verschil is met deze van staal.

Ook heeft [18] de treksterkte van bamboe onderzocht. Hierbij is niet de specifieke bamboesoort vermeld. De trekproeven werden uitgevoerd op proefstukken met een lengte van 300 mm zonder aanwezigheid van knopen in het centraal gedeelte, en met een oppervlakte van 200 mm<sup>2</sup>. Hierbij werd er gebruikgemaakt van een “Universal Testing Machine” (UTM) die zichtbaar is in Figuur 9. De gemiddelde treksterkte van de bamboe die volgt uit de testen bedraagt 169,27 MPa.



Figuur 9: Schets proefopstelling trekproeven [19, p. 3255]

Bij de trekproef wordt een constante belastingssnelheid van 10 mm/min opgelegd. De proefstukken zijn gemaakt uit strips met een smaller centraal gedeelte zodat de bamboe in deze zone faalt en niet ter hoogte van de klemmen. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 5.3.2 en 5.4.2.

Indien er gebruikgemaakt wordt van bamboe stokken in plaats van strips dient ervoor gezorgd te worden dat de uiteinden van de stokken die zich in de klemmen bevinden niet falen onder druk. Om dit te vermijden kan gebruikgemaakt worden van enkele behandelingen zoals:

- het omwikkelen van de uiteinden met gegalvaniseerd ijzer;
- het inbrengen van epoxy in de holle bamboe stokken;
- het aanbrengen van epoxy rondom het bamboe uiteinde.

Bovenstaande behandelingen worden in 5.3.1 Trialproeven verder besproken.

Een andere manier om de trekproef uit te voeren waarbij de treksterkte volgens de vezelrichting bepaald wordt is volgens de “American Society for Testing and Materials” (ASTM) 143-09 methode. Dit is de standaard testmethode voor kleine proefstukken uit hout. Dit onderzoek werkt met een trekmaschine die tot 100 kN aan kracht kan halen. De belastingssnelheid bedraagt 1 mm/min [8].

Ook bevat bamboe knopen, dit zijn verdikkingen in de stok. Deze knopen hebben hun invloed op de treksterkte van de bamboe. Uit testen van [20] komt naar voren dat de sterkte aanzienlijk toeneemt wanneer er geen knoop aanwezig is in vergelijking met de situatie met knoop. Zo is met afwezigheid van een knoop de treksterkte twee à vier keer groter dan wanneer er zich een knoop in het proefstuk bevindt, afhankelijk van de bamboesoort.

#### 4.1.2 Uittrekproef

De uittrekproef kan uitgevoerd worden volgens de “Indian Standard” IS 2770 (deel 1).

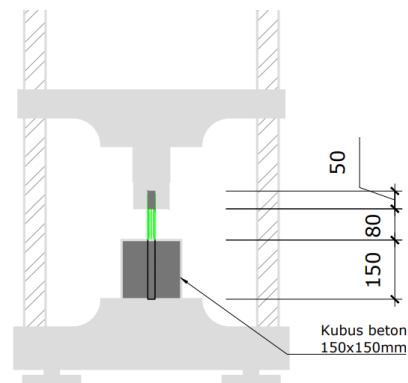
Bij de uittrekproef wordt er gekeken naar de sterkte van de verbinding tussen de bamboe en het beton, ook wel de hechtsterkte genoemd. Hierbij is het essentieel dat er geen slip optreedt tussen beide elementen / materialen. Afhankelijk van de verbinding zal het scheurpatroon variërend zijn, net zoals de algemene stijfheid van de doorsnede. Ook zijn er andere parameters die de eigenschappen van de verbinding beïnvloeden, zoals:

- nominale betondekking;
- afstand tussen de wapeningsstaven;
- grootte van de wapeningsstaven;

- dwarswapening;
- betoneigenschappen;
- eigenschappen van de wapening zelf;
- oppervlaktebehandeling van de wapening.

Ook belangrijk bij de uitvoering van de uittrekproef is dat er voldoende verankeringslengte wordt voorzien. Indien de verankeringslengte te kort wordt genomen zal er sneller slip optreden tussen bamboe en beton [5].

Figuur 10 geeft schematisch de proefopstelling weer van de standaard uittrekproef.



Figuur 10: Proefopstelling uittrekproef

Het doel van de uittrekproef is om de hechtsterkte tussen bamboe en beton te beproeven. Hiervoor is een zo sterk mogelijke verbinding tussen beide materialen noodzakelijk, aangezien de bamboe dient te falen en er geen slip mag optreden. De hechtsterkte wordt bepaald met Formule 1 [21] .

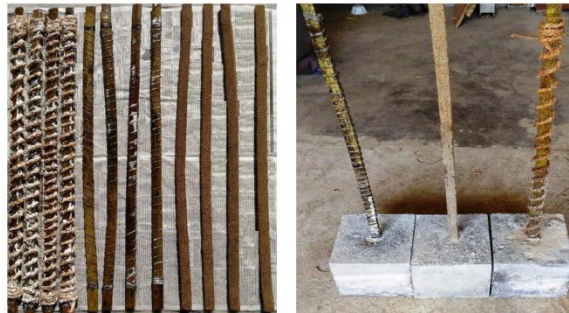
$$\tau_b = \frac{F_m}{L * S} \quad (1)$$

Waarbij:

- $F_m$  = trekkracht [N]
- $L$  = lengte van bamboe in beton [mm]
- $S$  = omtrek van de bamboestok [mm]

Niet alleen heeft [16] een trekproef op bamboe bestudeerd, maar ook de uittrekproef. Een belangrijk aandachtspunt is dat de proefstukken in bovenstaand onderzoek behandeld zijn geweest met een coating om een waterdicht geheel te vormen. De coating zorgt ervoor dat de waterabsorptie bij implementatie in beton minimaal is. Ook werd de bamboe besprenkeld met zand om zo een betere binding te krijgen met het beton. De waarde van de bindingssterkte was echter niet consistent maar variabel. Zo bedroeg de gemiddelde bindingssterkte 1,49 MPa op het deel van de bamboestok zonder knoop en 2,16 MPa op het deel met een knoop.

Een andere oplossing om het slipprobleem te voorkomen is door gebruik te maken van een epoxy coating in combinatie met een staaldraad. Hierbij is niet enkel het gedeelte van de bamboestok dat in de beton gaat gecoat, maar is er ook een stalen draad rond gewikkeld zoals zichtbaar in Figuur 11. Dit zorgt voor een betere verbinding tussen de bamboe en het beton waardoor de hechtsterkte toeneemt. Dit is positief aangezien de proefstukken moeten falen in de bamboe en niet ten gevolge van slip. De bindingssterkte tussen de bamboe en het beton bedroeg 9,71 MPa [21].



Figuur 11: Bamboe omwikkeld met een staaldraad [21, p. 441]

Een andere behandeling voor de bamboe is het aanbrengen van olieverbinding voorafgaand aan de test om zo de graad van adhesie te verhogen. Door het aanbrengen van olieverbinding gaat er minder krimp optreden bij het uitharden. De uittrekproef gebeurt dan volgens norm IS 2770. Omwille van voorgaande redenen zal ook de interfaciale sterkte tussen het beton en de bamboe verbeteren.

Een variant op bovenstaande behandeling is het aanbrengen van een coating, vervolgens bestrooien met fijn zand en omwikkelen met een metalen (kruis)draad. De sterkte van de verbinding van deze configuratie bedraagt 0,87 MPa. Dit is bijna twee keer groter in vergelijking met de 0,45 MPa hechtsterkte zonder enige vorm van behandeling. Deze resultaten komen voort uit een gemiddelde van drie proefstukken [22].

Ook is in het verleden reeds een uittrekproef uitgevoerd met een composietmateriaal. Hieruit volgt dat het beste resultaat verkregen werd wanneer de bamboe behandeld was met een epoxy coating op waterbasis. Ook werd er nog fijn of grof zand toegevoegd om de binding tussen het beton en de bamboe te versterken bovenop de reeds vermelde coating. Zo volgde uit de proeven dat het gebruik van zand voor een verbeterde bindingssterkte van ongeveer + 8% zorgt in vergelijking met de situatie wanneer er geen zand wordt aangebracht [23]. Een andere behandeling om een goede hechting te verkrijgen tussen het beton en de bamboe is door het gebruik te maken van Sikadur 32 Gel.

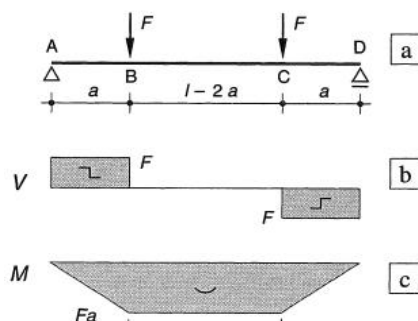
Ook zijn er reeds proeven uitgevoerd waarbij de bamboestok is behandeld met *Negrolin*. Dit is een bitumineus product dat als functie heeft om de waterabsorptie te beperken van de proefstukken in beton. In dit onderzoek is een onderscheid gemaakt tussen drie gevallen, namelijk (a) zonder enige vorm van behandeling, (b) het aanbrengen van *Negrolin* in combinatie met het besprenkelen van de stok met zand en (c) het aanbrengen van *Negrolin* in combinatie met zand en een staaldraad [24]. De resultaten van de hechtsterkte zijn zichtbaar in Tabel 2.

Tabel 2: Resultaten hechtsterkte met *Negrolin*

Behandeling	Hechtsterkte zonder knoop [MPa]	Hechtsterkte met knoop [MPa]
Zonder behandeling	0,52 (± 17%)	1,20 (± 17%)
<i>Negrolin</i> met zand	0,73 (± 12%)	1,55 (± 12%)
<i>Negrolin</i> met zand en staaldraad	0,97 (± 11%)	1,80 (± 15%)

### 4.1.3 Buigproef

De buigproef heeft twee varianten, namelijk een driepuntsbuigproef en een vierpuntsbuigproef. Het voordeel aan vierpuntsbuigproef is dat er zich in het centrale gedeelte (tussen de 2 middelste aangrijppunten) een constant momentenverloop voordoet waardoor het effect van lokale gebreken verwaarloosd kan worden. Dit wordt weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12: Vierpuntsbuigproef met (a) situatieschets; (b) krachtverloop; (c) momentenverloop [25, p.418]

De buigsterkte van bamboe is reeds bestudeerd door [26]. In deze testen is de bamboesoort *Moso* beproefd met behulp van een driepuntsbuigproef. De holle bamboestokken die als proefstukken gebruikt werden zijn verbonden met rekstrookjes (component om vervorming van een materiaal / proefstuk mee op te meten) en verplaatsingsmeters. Op basis van de resultaten konden de verplaatsing, elasticiteitsmodulus en spanning bepaald worden op basis van Formule 2 en 3.

$$\sigma = \frac{F_{max} * L * D_{min}}{12 * I} \quad (2)$$

$$E = \frac{23 * \Delta F * L^3}{1296 * \Delta \delta * I} \quad (3)$$

Waarbij:

- $F_{max}$  = maximaal aangebrachte kracht [N]
- $\Delta F$  = verschil tussen de maximale en minimale kracht [N]
- $L$  = lengte van het proefstuk [mm]
- $D_{min}$  = minimale diameter van de bamboe ter hoogte van steunpunten [mm]
- $\Delta \delta$  = verschil in doorbuiging in het middelste gedeelte tussen maximale en minimale belasting [mm]
- $I$  = traagheidsmoment [mm<sup>4</sup>]

Bij de test van de buigsterkte werd standaard een voorbelasting aangebracht van 100 N en werden de testen uitgevoerd aan eenzelfde constante snelheid (snelheid niet specifiek beschreven). Het falen van de bamboe initieerde zich ter hoogte van steunpunten. Uiteindelijk zijn de scheur- of faalpatronen zichtbaar wanneer de bamboe zijn maximale opneembare kracht waarneemt. De bamboestokken breken hierbij ook bros. Na het opmeten van de parameters en het beproeven van de bamboe zijn volgende resultaten verkregen (zie Tabel 3) [26].

Tabel 3: Verwachte en experimentele waarden van de buigproef [26]

	1	2	3	4	5	6
$F_{max}$ [N]	9800	10300	12100	6900	9500	12100
$L$ [mm]	900	900	900	900	900	900
$F_{max}$ [N]	75,55	84,57	88,37	78,46	81,42	88,37
$I$ [mm <sup>4</sup> ]	971727	1381082	1712128	982808	1238366	1712128
$\sigma_m$	57,14	47,3	46,84	41,31	46,85	46,84
						AVG
						47,71



Zoals zichtbaar in Tabel 3 bedraagt de gemiddelde experimentele buigsterkte 47,71 MPa.

Ook kan de buigproef uitgevoerd worden met bamboestrips in plaats van bamboestaven. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de oriëntatie van de vezels aangezien deze het breukgedrag beïnvloeden, en bijgevolg dus ook de sterkte van het proefstuk. Om de weerstand van het proefstuk te vergroten / maximaliseren wordt de binnenzijde bij voorkeur in de trekzone geplaatst terwijl de buitenzijde in de drukzone wordt geplaatst. De vezels ter hoogte van de binnenzijde beschikken over een grote flexibiliteit, wat ervoor zorgt dat deze in staat zijn om een grotere vervorming te ondergaan. Anderzijds beschikken de vezels van de buitenzijde over een grotere ductiliteit. Deze zijn dus beter in staat om een zekere rek te ondergaan als gevolg van de trekspanningen die ontstaan bij de buigproef [27].

## 4.2 Densiteit

Densiteit is de verhouding van de massa over het volume uitgedrukt in kilogram per kubieke meter.

Reeds is aangetoond door [28] dat de densiteit van bamboe groter is aan de buitenzijde en afneemt naar de binnenlagen toe van de wand. Hieruit kan gesteld worden dat de buitenste laag van bamboe de beste mechanische eigenschappen zou bezitten / hebben aangezien de sterkte toeneemt naarmate de densiteit vergroot [29]. Zo kan ook het identificeren van secties met een hoge(re) vezeldichtheid leiden tot het lokaliseren van gebieden met hoge mechanische eigenschappen. Als referentiewaarden voor de densiteit van bamboe wordt in de literatuur gewerkt met het interval 560 à 960 kg/m<sup>3</sup> [30]. In het kader van deze masterproef is er gewerkt met de bamboesoort Tonkin. Hierbij zijn er verschillende bamboestaven gebruikt waarvan een opsomming wordt gemaakt met bijhorende densiteit in 6.1 Densiteit.

Bamboe is een levend materiaal, dit maakt dat bamboe in de loop van zijn levensjaren groeit in lengte. Dit zorgt ervoor dat hoe ouder de bamboe is, hoe groter de vezels zijn. Aangezien de vezels daardoor ook meer op elkaar zitten is de densiteit van oudere bamboe groter in vergelijking met jongere bamboe. Dit is niet in grote mate, maar relatief klein. Zo volgt uit [31] dat de densiteit van bamboe van zijn tweede naar zijn vierde levensjaar met + 1% is gestegen.

Een manier om de densiteit te meten is door gebruik te maken van een pyknometer. Hierbij wordt eerst het gewicht bepaald van de pyknometer zelf in droge toestand. Vervolgens wordt het toestel volledig volgegoten met gedestilleerd water en opnieuw gewogen. Nu het toestel vol zit, wordt de bamboestok in de vloeistof gestoken. Dit zorgt ervoor dat er vloeistof door een opening van de pyknometer gaat verdwijnen. De massa van de pyknometer met bamboestok in wordt nu opnieuw gewogen. Door het verschil in massa opnieuw te wegen kan de densiteit van de bamboestok bepaald worden [32].

## 4.3 Waterabsorptie en vochtgehalte

Bamboe is een materiaal dat water kan absorberen. Hierdoor is het van groot belang dat er rekening wordt gehouden met dit fenomeen aangezien de bamboe in beton toegepast gaat worden. Bij de uithardingsfase van beton vindt de hydratatiereactie plaats waarbij het cement uithardt door in contact te komen met de voorziene waterhoeveelheid. Indien bamboe het water, dat voor de hydratatiereactie voorzien was, gaat opnemen zal het beton vervolgens zijn verwachte sterkte niet behalen.

Een ander gevolg van de opname van het water is dat de bamboe gaat uitzetten of zwellen. Als gevolg van de zwellen kan het beton mogelijk gaan scheuren, aangezien de spanningen door de uitzetting van het bamboe te groot worden.

Onbehandelde bamboe absorberen water / vocht uit het beton en de buitenomgeving waardoor het opzwellt, maar zal op een zeker moment terug krimpen door een vermindering aan vochtgehalte omdat het beton deze terug opneemt uit de bamboe. Door deze zwellen en krimp van de bamboe en het niet-ideale hydratatieproces van het beton zal de verbinding tussen het bamboe en beton niet optimaal zijn. Om ervoor te zorgen dat de hechting tussen de twee materialen optimaal is, moet er een oppervlaktebehandeling toegepast worden. Door oppervlaktebehandeling toe te passen zal de bamboe minder tot geen vocht uit het beton en omgeving opnemen waardoor er geen spanningspieken ontstaan en het beton zijn voorziene sterkte kan bereiken. Ook zal de oppervlaktebehandeling zorgen voor een betere binding tussen beide materialen waardoor de hechtsterkte toeneemt [5], [33].

In het onderzoek van [34] is er gekeken naar de invloed van vochtabsorptie in relatie met de sterkte. Hiervoor zijn de proefstukken 21 dagen bewaard in een natte kamer met een temperatuur ( $20 \pm 2$ )°C en met een relatieve vochtigheid van ( $60 \pm 2$ )%. Tabel 4 geeft een overzicht van de hoeveelheid water die geabsorbeerd is gedurende deze 21 dagen, de treksterkte in droge toestand, de treksterkte in vochtige toestand en het procentuele verschil tussen de treksterktes in beide gevallen en het verschil in gemiddelde treksterkte van de droge naar de vochtige toestand.

Tabel 4: Procentuele weergave verschil in waterabsorptie en treksterkte

Proefstuk	Waterabsorptie [%]	Treksterkte droge toestand [MPa]	Treksterkte vochtige toestand [MPa]	Procentueel verschil in treksterkte [%]
1	0,6905	220,22	223,29	1,39
2	0,7332	215,27	214,82	-0,2
3	0,6949	182,26	103,06	-43,45
4	0,6705	188,09	114,25	-39,26
5	0,5854	246,16	234,62	-4,68

Wanneer er wordt gekeken naar de gemiddelde waarden in Tabel 4 kan er geconcludeerd worden dat er in deze testen een gemiddelde afname is van treksterkte met - 17,94%.

Ook dient er aandacht gegeven te worden aan de vochtigheid van de bamboe en zijn omgeving. Bamboe is een materiaal dat gevoelig is voor aantasting door schimmels en bacteriën. Schimmels en bacteriën ontwikkelen zich het best en snelst in omgevingen met een hoge vochtigheid, met name een vochtigheid hoger dan 15%. Hierdoor moet vermeden worden dat het bamboe wordt bewaard in een omgeving waar deze schimmels en bacteriën actief zijn. Zo is het drogen van bamboe ook van essentieel belang indien het bamboe als doeleinde heeft gebruikt te worden als structureel element zoals wapening in beton [5].

#### 4.4 Bamboe op lange termijn

Betonconstructies met conventionele staalwapening worden doorheen de tijd aangetast doordat de wapening blootgesteld is aan de buitenomgeving omwille van extern inwerkende factoren. Uit het onderzoek van Ghavami, K dat reeds gestart is in 1979 blijkt dat bamboe weinig invloed ondervindt van externe inwerkende factoren ten opzichte van staal [5]. Vooraleer de bamboe in het beton werd geïmplementeerd, werd deze behandeld tegen insecten en voor een betere binding met het beton.

Uit dit onderzoek blijkt dat de bamboewapening na vijftien jaar bloot te liggen, nog steeds in uitstekende kwaliteit is ten opzichte van de metalen wapening. De metalen wapening is zichtbaar gecorrodeerd en moest vervangen worden. Ondanks dat de bamboewapening er nog goed uitzag, is deze uit het beton gehaald en getest om de mechanische eigenschappen te onderzoeken. Uit deze testen bleek dat de

treksterkte van deze staven lichtjes afgenomen was in vergelijking met ongebruikte bamboestokken van dezelfde soort.

## 4.5 Bamboe vs staal

Bamboe en staal zijn twee totaal verschillende materialen. Het verschil tussen beide materialen uit zich bijgevolg ook in de karakteristieke eigenschappen. Het eigengewicht van bamboe varieert tussen de 560 à 960 kg/m<sup>3</sup> terwijl het eigengewicht van staal ongeveer 7850 kg/m<sup>3</sup> bedraagt. De elasticiteitsmodulus van staal bevindt zich rond de 210 000 MPa terwijl die van bamboe rond de 21000 MPa ligt. Hieruit volgt  $E_{staal}/E_{bamboe} = 10$  [35].

Voor het verschil in treksterkte kan er niet een eenduidige conclusie gevormd worden. Zo is de treksterkte van respectievelijk staal en bamboe sterk afhankelijk van het type en soort dat beschouwd wordt. Er kan aangenomen worden dat bamboe beschikt over een treksterkte van 100 à 120 MPa terwijl het in uitzonderlijke gevallen zelfs mogelijk is dat er waarden tot 240 MPa worden bereikt [36]. Indien er specifiek constructiestaal beschouwd wordt dan kan er aangenomen worden dat de treksterkte varieert tussen de 400 à 550 MPa. In 6.3 Trekproef worden de resultaten van deze masterproef aangehaald waarin bovenstaande verbanden en eigenschappen met waarden worden gestaafd.

Bovenstaande gegevens zorgen ervoor dat er een verhouding kan worden opgesteld van de treksterkte en eigengewicht van zowel bamboe als staal. Hieruit komt voort dat de verhouding treksterkte / eigengewicht ruwweg twee tot zes maal groter is voor bamboe dan voor staal [5], [35], [36].

Uit studie van [37] volgt dat de opgenomen trekkracht door bamboe niet voldoende zou zijn om staal te vervangen. Staal als wapening in beton bevat een vervormcapaciteit van 30 à 52% (voor zacht staal) en is in staat om een trekkracht van 400 à 550 MPa op te nemen. Bamboe daarentegen kan slechts 100 à 120 MPa in trekkracht opnemen en bevat een kleinere vervormcapaciteit 0 à 15 %. Bijkomend is het faalgedrag van bamboe bros bij een te hoge belasting terwijl wapeningsstaal eerst ductiel gaat vervormen.

## 4.6 Faalmodus bij proeven

Het hoofddoel van deze masterproef is het bepalen van de mechanische eigenschappen van bamboe. Tijdens het uitvoeren van de testen is het belangrijk om specifiek aandacht te besteden aan de optredende faalmodi. Het bestuderen van de faalmodi heeft verschillende voordelen, namelijk:

- het materiaal beter leren begrijpen;
- preventieve maatregelen nemen om bepaalde faalmodi te vermijden;
- vermijden van falen door vooraf de zwakke punten te identificeren.

Hierdoor is het mogelijk optredende problemen met bamboe te vermijden waardoor de relevantie en accuraatheid van de resultaten van het toekomstig onderzoek bijgevolg toeneemt.

### 4.6.1 Drukproef

Volgens [38] volgt er dat proefstukken waarbij er zich een knoop bevindt in het midden van de stok een breuk wordt waargenomen ter hoogte van de knoop. Echter, voor proefstukken waarbij er geen knoop aanwezig is, wordt er een verticale scheur waargenomen. Hierbij zal de het proefstuk splijten ter hoogte van het zwakste punt in de mantel. Hierdoor zal de hechting tussen de vezels verloren gaan waarna het proefstuk faalt.

Volgens het onderzoek van F. Chung en W.K. Yu is de faalmodus van bamboe niet eenduidig te wijten aan de ligging van de knopen, maar ook afhankelijk van de vochtigheid van de proefstukken. Uit dit onderzoek volgt dat de faalmodus bij een hoge vochtigheid gevolgd wordt door een breuk eindpunten (*end bearing*) terwijl de faalmodus bij een lage vochtigheid wordt waargenomen door splijting ter hoogte van de verticaal lopende vezels [39].

Ten opzichte van [38], [39] wordt er in het onderzoek van Daud een onderscheid gemaakt tussen brede en smalle proefstukken. Hieruit blijkt dat het falen bij dikke proefstukken optreedt ter hoogte van de eindpunten terwijl er bij dunne proefstukken eerder een splijting werd waargenomen [40].

Uit bovenstaande beschrijvingen is het duidelijk dat het faalgedrag van bamboe onder druk niet eenduidig gelinkt kan worden aan één specifiek aspect maar wel dat dit te maken heeft met een samenloop aspecten. Voor dit onderzoek is het belangrijk om de invloed van een knoop te testen om de resultaten uit [38] te verifiëren. Bijkomend kan er ook een onderscheid gemaakt worden tussen proefstukken met een hoge en lage vochtigheid aangezien deze een grote invloed heeft op de sterkte.. Een onderscheid maken tussen dikke en dunne proefstukken is in het kader van dit onderzoek niet gewenst aangezien het niet mogelijk is om correcte conclusies te trekken doordat de variatie in beschikbare diameters te beperkt is.

#### 4.6.2 Trekproef

Uit [38] volgt dat bij de uitvoering van een trekproef externe effecten minder meespelen in het faalgedrag ten opzichte van de drukproef. Dit is geldig voor zowel voor proefstukken met een knoop in het midden, als voor proefstukken zonder knoop. In beide gevallen treedt een breuk op in het midden van het proefstuk.

Ten opzichte van [38] stelt [41] dat er scheuren optreden voorafgaand aan het brosse breukgedrag. Hierbij werden vier soorten van scheuren waargenomen bij het uitvoeren van 162 trektesten. De vier types van scheuren luiden als volgt:

- langsscheuren;
- onregelmatige langsscheuren;
- onregelmatige dwarsscheuren;
- willekeurige scheuren zonder regelmaat.

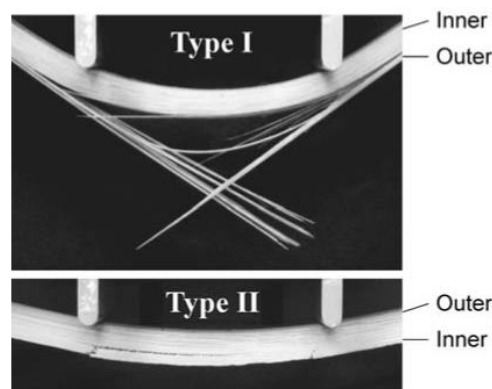
Om ervoor te zorgen dat de trekproef succesvol uitgevoerd kan worden dient er rekening gehouden te worden met het feit dat bamboe een relatief zacht materiaal is. Hierdoor kan bij de inklemming van het proefstuk een breuk ontstaan. Voor de uitvoering van de proef dient het proefstuk stevig vastgeklemd te worden om slip ter hoogte van de inklemmingspunten te vermijden vanwege het gladde buitenoppervlak. Een oplossing om dit probleem op te lossen kan gebeuren door staaldraad met een diameter van 2 mm te gebruiken die spiraalvormig aan beide uiteinden van het proefstuk worden gewrongen [42]. Hierdoor wordt het contactoppervlak tussen de proefstukken en de testmachine ruwer waardoor de wrijvingscoëfficiënt bijgevolg toeneemt. Deze oplossing kan in combinatie met een hard vulmiddel aan de binnenzijde van de proefstukken gebruikt worden zodat er een grotere kracht uitgeoefend kan worden zonder het proefstuk te beschadigen.

#### 4.6.3 Buigproef

Uitvoeren van de buigproef op bamboe brengt in de praktijk problemen met zich mee. Bamboe is een flexibel materiaal waardoor deze een grote doorbuiging ondergaat. Voor buigmachines is het realiseren

van een grote uitwijking ten gevolge van een grote doorbuiging van de proefstukken niet altijd mogelijk. Hierdoor moet er voor het testen van de buigsterkte van bamboe soms gebruikgemaakt worden van andere testapparatuur om deze grote uitwijking toch mogelijk te maken. Zo kan er bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van een trekbank zolang er voldaan blijft aan de oplegvoorwaarden van de proefstukken.

Als variant op de klassieke buigproef met de hele bamboestok kan deze ook uitgevoerd worden met strips. Bij de uitvoering van deze test is de oriëntatie van de vezels belangrijk. De oriëntatie heeft een invloed op het breukgedrag en bijgevolg ook op de totale sterkte van het proefstuk [27]. Voor de oriëntatie zijn er twee mogelijkheden namelijk: de binnenkant van de bamboestaaf in trek en de buitenkant in druk oftewel de binnenkant van de bamboestaaf in druk en de buitenkant in trek. Een afbeelding van beide mogelijkheden is zichtbaar in Figuur 13.



Figuur 13: Uitvoering buigproef op bamboestrips met een verschillende oriëntatie [27, p 394]

Afhankelijk van de oriëntatie zal bijgevolg ook een ander breukpatroon optreden. Indien de binnenkant in druk wordt gezet en de buitenkant in trek (type I), dan zullen de getrokken vezels zich geleidelijk aan losmaken van elkaar (dissociëren) terwijl de vezels zelf wel intact blijven. Deze faalmode volgt door een gebrek aan adhesie tussen de onderlinge bamboevezels.

Een andere mogelijkheid qua oriëntatie is de buitenkant in druk en de binnenkant in trek (type II). In dit geval zullen de vezels niet los komen van elkaar maar zal er een breuk ontstaan ter hoogte van de getrokken zone. Deze faalmode kan verklaard worden doordat de maximale trek- en afschuifkracht worden bereikt in het proefstuk.

Ondanks dat dit onderzoek werkt met strips kunnen de resultaten voor het gebruik van bamboe als wapening relevante informatie bieden. Zo heeft de oriëntatie van de vezels geen invloed op de sterke, maar wel op de ductiliteit van het materiaal. Zo bedraagt de totale kromming bij proefstukken van type I bijna twee keer de kromming ten opzichte van proefstukken bij type II zonder dat er een groot verschil in stijfheid wordt waargenomen.

Indien bamboe in beton gebruikt wordt dan zal de staaf reageren zoals de proefstukken van type II. Hierbij zal er een grote kromming plaatsvinden waarbij de volledige trek- en afschuifkracht bereikt wordt.

#### 4.7 Behandelen van bamboe

Uit de literatuur volgt dat bamboe bij voorkeur wordt behandeld vooraleer deze geïmplementeerd wordt in het beton. De keuze van behandelingstechniek hangt af van de gewenste eigenschap die verbeterd moet worden en van het budget dat ter beschikking is.

Bamboe gaat water opnemen in zijn structuur wanneer deze wordt blootgesteld aan een vochtige omgeving. Bij de inwerking in beton is het gewenst dat deze zo min mogelijk vocht kan opnemen. Dit kan gebeuren aan de hand van een waterbestendige laag door de bamboestaven te vernissen. Ook is het mogelijk om bitumen te gebruiken als waterbestendige laag. Dit materiaal kan de waterabsorptie tot 75% beperken [43]. In verschillende bronnen wordt bitumen voorgesteld als een oplossing voor dit probleem [43]-[45]. Wanneer het noodzakelijk is om een betere adhesie te krijgen tussen bamboe en beton dan zal deze oplossing slechts een beperkte meerwaarde bieden. Echter, wanneer deze oplossing wordt gecombineerd met een besprenkeling van zand of plasticen schilfers, dan zal de adhesie toenemen met 40% [44]. Buiten bitumen worden epoxy's (zoals Sikadur 32) vaak voorgesteld in de literatuur als adhesieverbetering (zie 4.1.2 Uittrekproef).

Het oppervlak van de mantel van bamboe is glad. Dit zorgt voor een slechte bindingssterkte met beton. De hechtsterkte kan verbeterd worden door een metalen ijzerdraad rond de staaf te binden om zo een ruwer contactoppervlak te bekomen. Dit type van oppervlakteverbetering is tijdrovend in aanbreng waardoor dit niet gewenst is in de praktijk. In de huidige maatschappij zorgen werkuren namelijk voor een groot aandeel in de totaalprijs waardoor de kostprijs hierdoor niet verlaagd kan worden. In academische doeleinden biedt deze oplossing echter wel een voordeel. Zo zorgt de staaldraad voor een betere grip tijdens de trekproef waardoor slip wordt vermeden [18].

Bamboe kan bewaard worden door het in water te laten weken een waterbestendige laag geven door middel van vernissen en de techniek van het maken van bamboe wapening met torsie en het rondom winden van de bamboestok met draad [46]. Dit gaat gepaard met een daling van het hygroscopische effect zodat de hechtsterkte tussen beton en bamboe geoptimaliseerd kan worden.

Bamboe is een natuurlijk materiaal waardoor deze snel weg kan rotten indien de betondekking de staven niet voldoende kan beschermen tegen uitwendige factoren. Om de duurzaamheid te verhogen is het mogelijk om calciumhydroxide  $Ca(OH)_2$  toe te voegen. Buiten het verhogen van de duurzaamheid zorgt calciumhydroxide ook nog voor een verhoogde flexibiliteit van de bamboestaven [43]. Deze verhoogde flexibiliteit is ten zeerste gewenst aangezien een brosse breuk van de bamboestaven op zijn beurt zorgt voor een verlies van sterkte van de hele balk.

## 4.8 Proeven op balken

In de literatuur zijn er reeds testen uitgevoerd op balken (3400 x 120 x 300 mm) die gewapend zijn met bamboe waarbij het wapeningspercentage varieerde tussen 0,75 en 5%. Voorafgaande aan de testen zijn de bamboestokken behandeld in de volgende volgorde:

- buitenoppervlak schuren;
- coaten met een ondoordringbaar product (product niet vermeld);
- besprenkelen met zand;
- wikkelen van een staaldraad van 1,5 mm dik;
- coaten met een ondoordringbaar product;
- besprenkelen met zand.

Uit het resultaat van deze testen komt voort dat een wapeningspercentage van 3% het beste resultaat geeft. De betonnen balk kon hierbij vier keer meer belasting opvangen in vergelijking met de situatie zonder wapening [5].

Een ander onderzoek toont aan dat de sterkte van een met bamboe gewapende balk (750 x 200 x 200 mm) met hoge nauwkeurigheid ingeschat kan worden [47]. Analoog aan [5] wordt er een coating aangebracht ter reductie van de waterabsorptie. Voor dit onderzoek is er gebruikgemaakt van een coating van asfalt. De bedoeling van dit onderzoek was om een vergelijking te maken tussen de analytische en experimentele resultaten die verkregen worden voor het maximale buigmoment bij een vierpuntsbuigproef. Bij dit type van proef is het niet gewenst dat de balk zou falen door dwarskracht. Dit wordt opgelost door supplementair aan de bamboewapening gebruik te maken van stalen beugels van 8 mm. Experimenteel en analytisch zijn het maximale buigmoment berekend met de Formule 4 en 5:

$$M_{max,experimenteel} = \frac{P*L}{6} \quad (4)$$

Waarbij:

- P = maximale kracht [N]
- L = lengte van de overspanning [mm]

$$M_{max,analytisch} = 0,87 * f_y * A_{bt} * d * \left[ 1 - \left( \frac{A_{bt} * f_y}{b*d * f_{ck}} \right) \right] \quad (5)$$

Waarbij:

- $f_y$  = karakteristieke sterkte van de wapening [N/mm<sup>2</sup>]
- $A_{bt}$  = doorsnede van de wapening [mm<sup>2</sup>]
- d = effectieve hoogte [mm]
- b = breedte [mm]
- $f_{ck}$  = karakteristieke druksterkte beton [N/mm<sup>2</sup>]

Het verschil tussen analytische en experimentele resultaten bedraagt voor dit onderzoek slechts 1% [47].

Ten opzichte van [5], [47] zijn er ook proeven uitgevoerd waarbij er geen behandeling tegen waterabsorptie is uitgevoerd [18]. In dit onderzoek is specifiek onderzocht wat het verschil in sterkte is tussen een balk gewapend met staal en bamboe. Voor de balken gewapend met bamboe zijn er twee types uitgevoerd, namelijk met twee en zes bamboestokken waarvan de afmetingen 10 x 20 mm bedroegen. Voor de staalwapening was diameter 12 als referentie genomen. Tabel 5 geeft het resultaat van dit onderzoek weer.

Tabel 5: Resultaten buigtesten voor betonnen balk [18, p. 9]

	7 dagen [kN]	28 dagen [kN]
Staal	69,15	110,37
2 bamboestokken	51,80	76,80
6 bamboestokken	62,13	85,83

Uit dit onderzoek volgt dat er met onbehandelde bamboe als wapening een grote sterkte bereikt kan worden. Door te wapenen met twee bamboestokken kan een sterktecapaciteit tot 70% ten opzichte van staal verkregen worden. Door gebruik te maken van 6 bamboestokken stijgt deze waarde zelfs tot 78%. Echter moet er bij de resultaten van dit onderzoek rekening gehouden worden met de manier van testen ten opzichte van [18] en [47] aangezien binnen dit onderzoek gebruikgemaakt is van een driepuntsbuigproef in plaats van een vierpuntsbuigproef. Ondanks dit minimaal verschil toont dit onderzoek dat het gebruik van bamboe als wapening zeker over potentieel beschikt. De resultaten uit dit onderzoek worden bevestigd door het onderzoek van A. Agarwal, B. Nanda en D. Maity [48]. Uit dit

onderzoek bleek een balk met een wapeningspercentage van 8% aan bamboe, 95% van de sterktecapaciteit bereikt ten opzichte van een balk gewapend met 0,89% aan staal. Bijkomend wordt vermeld dat het behandelen van bamboe een noodzakelijk stap was om een goede verbinding te krijgen met het beton. Zonder deze hechting nam de sterkte van de balk niet toe door bamboe te gebruiken als wapening.

Uit het onderzoek van M.Terai en K. Minami volgt dat een balk (of kolom) gewapend met bamboe eenzelfde scheurpatroon vertoont als een conventioneel gewapende balk (of kolom) [49]. Aan de hand van deze informatie kan er geconcludeerd worden dat de bamboestokken geen brosse breuk vertonen maar eerder ductiel gedrag vertonen. Dankzij dit ductiel gedrag stellen de schrijvers dat formules die geldig zijn voor de berekening van gewapend beton evenzeer geldig zijn voor wapening met behulp van bamboe. Dit resultaat toont bijgevolg enige gelijkenissen met [47] aangezien hier de experimentele waarden nagenoeg volledig overeenkomen met de analytische waarden.





## 5 Materiaal en methoden

### 5.1 Bewaring bamboestokken

Op 10 januari 2023 zijn de bestelde bamboestokken aangekomen in het ACB<sup>2</sup>. De bamboestokken zijn vanaf dit moment bewaard in de kelder van dit gebouw. Het labo is een plaats waar de temperatuur en vochtigheid in beperkte mate varieert. Het vochtgehalte van geteste proefstukken bedraagt gemiddeld 13% (zie 6.2 Vochtabsorptie en droging). Hierdoor kan er aangenomen worden dat de bamboestokken dezelfde vochtigheid en temperatuur bevatten.

De proefstukken waarvan de vochtabsorptie is bepaald zijn bewaard gebleven in een waterbak in een niet-verwarmde binnen omgeving bij een gemiddelde temperatuur van 15°C en relatieve vochtigheid van 55%. Deze waarden zijn echter niet gemeten, maar er wordt verondersteld dat dit gangbare waarden zijn.

### 5.2 Samenstelling betonmengsel

Voorafgaand aan de voorbereiding van proeven moet er een betonmengsel gekozen en samengesteld worden. De samenstelling is afhankelijk van verschillende variabelen die bijgevolg elk een bepaalde invloed hebben op de andere parameters. Voor de bepaling van de samenstelling wordt het stappenplan in Eurocode 2 gevolgd.

#### 5.2.1 Randvoorwaarden

In laagbouw en particuliere woningen worden balken hoofdzakelijk gebruikt in de binnenomgeving, afgeschermd van de buitenomgeving door een buitenspouwblad. Hierdoor worden de balken niet blootgesteld aan externe invloeden zoals vorst, regen of dooizouten. Op basis van deze gegevens volgt de omgevingsklasse EI.

Met behulp van de omgevingsklasse worden minimale eisen aan de duurzaamheidsklasse, betondekking, cementgehalte en sterkteklasse gesteld. De waarden voor deze variabelen bedragen respectievelijk: T(0,65), 15 mm, 260 kg/m<sup>3</sup> en C16/20.

Voor de sterkteklasse wordt er gekozen voor C20/25. Uit de lessenreeksen van ‘dimensioneren van beton’ en tijdens de stageperiode is gebleken dat er in de praktijk zelden tot nooit sterkteklassen lager dan C20/25 worden gebruikt. Met het oog op het gebruik in minder ontwikkelde landen wordt er aangenomen dat deze sterktes ook hier behaald worden. Bijkomend is de gekozen sterkteklasse beter dan de minimale eis waardoor deze aanname bijgevolg betontechnisch acceptabel is.

#### 5.2.2 Keuze betonmengsel

Voor het betonmengsel wordt er gekozen om een voorgeschreven samenstelling door de Federatie van de Belgische Cementnijverheid (Febelcem) te gebruiken. De voorgeschreven mengsels bestaan uit granulaten die in grote mate beschikbaar zijn aan voordelige prijzen waardoor deze in het kader van deze masterproef uiterst gewenst is. De gekozen samenstelling is zichtbaar in Tabel 6.

Tabel 6: Keuze betonsamenstelling [50]

<b>CEMENT</b> - klasse 52,5 (of 52,5 R): voor uitvoering bij zeer koud weer - klasse 42,5 (of 42,5 R): voor constructief beton (kolommen, balken, wanden, ...) - klasse 32,5 (of 32,5 R): voor funderingen; eventueel ook voor weinig belast constructief beton	NB: Zijn doorgaans in zakken verkrijgbaar: CEM I 42,5; CEM I 52,5 en CEM II / B-M 32,5 Cement met BENOR-merk verdient de voorkeur
--	--

**BETONSAMENSTELLINGEN in volumes (delen)** - welke recipiënt u kiest heeft geen belang (emmer, kom...) maar gebruik wel steeds dezelfde! -

of in gewicht:

BESTEMMING VAN HET BETON	GEOKOZEN GRIND OF STEENSLAG	AANTAL VOLUMES VOOR 1 VOLUME CEMENT			AANTAL VOLUMES AANTAL LITER VERS BETON	
		AANTAL LITER (KG) VOOR 1 ZAK VAN 50 KG CEMENT	Grind/Steenslag	Rijnzand		Water
CONSTRUCTIEF BETON	topkwaliteit (betonconstructies in open lucht, al of niet gewapend, blootgesteld aan regen en/of vorst)	4/28	2 3/4 volumes 110 liter (180 kg)	1 volume 45 liter (75 kg)	1/2 volume 20 liter	3 1/4 volumes 135 liter
		4/14 of 7/20	2 1/2 100 (160)	1 45 (75)	1/2 20	3 120
		2/7	1 3/4 75 (105)	1 45 (75)	1/2 20	2 1/2 105
	gewone kwaliteit (betonconstructies al of niet gewapend, binnen of buiten, maar beschermt tegen regen en vorst)	4/28	3 130 (205)	1 1/2 60 (100)	2/3 25	3 3/4 160
		4/14 of 7/20	2 3/4 115 (160)	1 1/2 60 (100)	2/3 25	3 1/3 140
		2/7	2 85 (120)	1 1/2 60 (100)	2/3 25	3 125
FUNDERINGS-BETON	met Rijnzand	4/28, 7/20 of 4/14	3 3/4 155 (220)	2 80 (130)	3/4 30	4 1/3 180
	met fijn zand		3 1/2 145 (200)	2 85 (110)	3/4 30	4 165

In Tabel 6 is de verhouding tussen granulaten, cement en water beschikbaar voor een betonvolume van 140 l. Voor de productie van 140 l beton is er 160 kg grind met korreldiameter 7-16 mm, 100 kg rijnzand met korreldiameter 0-3 mm en 50 kg cement nodig. Bijkomend is er voor de binding nog 25 l water nodig indien het zand volledig droog is. Afhankelijk van de vochtigheid van het beschikbare zand dient er minder water toegevoegd te worden aangezien het water dat zorgt de vochtigheid van het zand reeds meetelt in de 25 l toe te voegen hoeveelheid.

In verband met het minimale cementgehalte is het zichtbaar dat er voldaan wordt aan een minimale hoeveelheid van 260 kg/m<sup>3</sup>. Zo bedraagt de exacte hoeveelheid cement voor dit mengsel 357,1 kg/m<sup>3</sup>. In verband met het watergehalte moet er nog een controle uitgevoerd worden zodat de water-cementfactor niet wordt overschreden voor dit mengsel.

### 5.2.3 Controle w/c-factor

Voor de controle van de w/c-factor wordt er gebruik gemaakt van de formule van Walz (Formule 6).

$$f_{cm,cube} = 0,46 * f_{cm,cm} * \left( \frac{1}{w/c - factor} - 0,06 \right) \quad (6)$$

Waarbij:

- $f_{cm,cube}$  = gemiddelde druksterkte van een betonnen kubus [N/mm<sup>2</sup>]
- $f_{cm,cm}$  = gemiddelde druksterkte van het cement [N/mm<sup>2</sup>]
- w/c-factor = verhouding van water over cement

Om deze formule in te vullen moeten  $f_{cm,cube}$  en  $f_{cm,cm}$  eerst bepaald worden (Formule 7).

$$f_{cm,cube} = (f_{ck} + 10) \frac{N}{mm^2} = 25 + 10 = 35 \frac{N}{mm^2} \quad (7)$$

Waarbij:

- $f_{ck}$  = karakteristieke kubusdruksterkte [N/mm<sup>2</sup>]

Voor de cementsoort wordt er gekozen voor CEM I 52,5 N. Deze cementsoort is echter te sterk voor de relatief laag benodigde sterkte voor het betonmengsel C20/25. Toch wordt er voor deze cementsoort gekozen wegens directe beschikbaarheid in het labo.

Omvorming en invulling van de formule van Walz (Formule 6) geeft het volgende resultaat:

$$w/c - factor = \frac{1}{\frac{1}{0,46} \cdot \frac{f_{cm,cube}}{f_{cm,cem}} + 0,06} = \frac{1}{\frac{1}{0,46} \cdot \frac{35}{52,5} + 0,06} = 0,66$$

Hieruit volgt dat de benodigde w/c-factor 0,66 bedraagt. Deze waarde is 0,01 groter dan de maximale waarde die de duurzaamheidseis stelt. Hierdoor wordt de w/c-factor van 0,65 behouden als maximale waarde. Door de w/c-factor te bepalen op basis van de voorgeschreven samenstelling wordt een w/c-factor van 0,5 bekomen, welke opnieuw kleiner is dan de maximale waarde.

#### 5.2.4 Controle druksterkte

De gemiddelde druksterkte wordt gecontroleerd aan de hand van de formule van Buist (Formule 8).

$$f_{cm(j)} = a * N_j + \frac{b}{\frac{w}{c} - factor} - c \quad (8)$$

Waarbij:

- a, b, c = coëfficiënten waarvan de grootte bepaald wordt door de grondstoffen in het beton  
a = 0,85 ; b = 33 ; c = 62 (CEM I)
- $N_j$  = sterkte cement na n dagen

De waarde voor parameter  $N_j$  wordt bekomen door de technische fiche van het gebruikte beton te raadplegen (CEM I 52,5 N van het merk Holcim). In deze technische fiche wordt er geen druksterkte gegeven na 7 dagen, maar wel een grafiek van de betondruksterkte in functie van de tijd. In samenspraak met een betonexpert (Ir. Johan Horckmans) is er besloten dat de betondruksterkte uit de technische fiche gebruikt mag worden om de formule van Buist in te vullen. Hieruit volgt dat er na respectievelijk 7 en 28 dagen een druksterkte van 53 en 61 MPa wordt gevonden voor het cement. Door deze waarden in formule van Buist in te vullen voor de druksterkte van het beton na 7 en 28 dagen worden de volgende resultaten bekomen:

$$f_{cm(7)} = 0,85 * 53 + \frac{33}{0,5} - 62 = 49,1 \text{ MPa}$$

$$f_{cm(28)} = 0,85 * 61 + \frac{33}{0,5} - 62 = 55,9 \text{ MPa}$$

Op basis van deze resultaten voorziet het samengesteld mengsel een C45/55. Echter moet er rekening gehouden worden dat het betonmengsel in de technische fiche verschillen vertoont ten opzichte van het beton dat gebruikt wordt in deze masterproef. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat de resultaten zullen afwijken ten opzichte van deze berekening.

### 5.3 Klaarmaken proefstukken

Het klaarmaken van de proefstukken is gespreid over verschillende momenten aangezien het omwille van opgetreden problematiek niet mogelijk was om alles in één keer te doen. Bij het klaarmaken van de proefstukken kreeg ieder proefstuk een unieke identificatie, zodanig dat er bij afwijkende resultaten,

steeds teruggekoppeld kan worden naar een eventuele afwijking van de stok in het geheel. De proeven en deelproeven die in het kader van deze masterproef worden uitgevoerd zijn zichtbaar in Tabel 7.

Tabel 7: Uitgevoerde proeven

Proef	Deelproef	Herhalingen
Trekproef	Bamboestrips	19
	BE500 Diameter 10 mm	3
Uitrekproef	Zonder knoop in beton Geen behandeling	5
	Met knoop in beton Geen behandeling	5
	Zonder knoop in beton Behandeling: bitumen	5
	Zonder knoop in beton Behandeling: bitumen + zand	5
	BE500 Diameter 10 mm	5
Drukproef (Betonkubus)	Na 8 dagen	3
	Na 29 dagen	3
	Na 32 dagen (Tijdens uitvoeren uitrekproef)	2
Buigproef	Zonder knoop in het midden	5
	Met knoop in het midden	5
Densiteit	/	16
Vochtabsorptie	Zonder knoop	5
	Met knoop	5
	Met 2 knopen	5

### 5.3.1 Trialproeven

Volgens NBN ISO 22157 moet de treksterkte van bamboe evenwijdig aan de vezelrichting gemeten worden aan de hand van strips die verkregen worden door de kolom te splijten. Tijdens het klaarmaken van de proefstukken is gebleken dat het niet mogelijk is om de proefstukken te splijten met een dunne metalen lat zonder de proefstukken te beschadigen. Omwille van deze reden worden er voorafgaand op de eigenlijke testen trialproeven uitgevoerd om te controleren of het mogelijk is om trekproeven uit te voeren op een volledige kolom. Bij deze testen is het belangrijk dat er geen verbrijzeling optreedt ter hoogte van de eindzones van de bamboestok na de inklemming. Schade door de inklemming zorgt voor een zwak punt waardoor scheuren zullen ontstaan vanaf dit punt waardoor de effectieve sterkte van de proefstukken niet wordt bereikt. Bijkomend is het ook belangrijk dat er bij het uitvoeren van de proeven geen slip optreedt tussen de gladde bamboestokken en de inklemming. Dit wordt opgelost door gebruik te maken van hulpstukken die speciaal ontworpen zijn voor de inklemming van kleine proefstukken. Een afbeelding van deze hulpstukken is zichtbaar in Figuur 14.



Figuur 14: Hulpstukken ter inklemming van de proefstukken

Om een goede inklemming te verkrijgen wordt in combinatie met de hulpstukken in Figuur 14 een horizontale kracht op de proefstukken aangebracht. Hierbij bestaat nog altijd het gevaar dat de proefstukken verbrijzeld raken in de eindzones aangezien de bamboestokken niet massief zijn maar wel hol. Dit wordt opgelost door verbeteringen uit te voeren in de eindzones. Naar analogie van [51] worden drie conceptuitwerkingen getest samen met drie zelf voorgestelde oplossingen.

- *Conceptoplossingen literatuur*

De eerste voorgestelde oplossing is de opvulling van de stam met een epoxy, namelijk Sika AnchorFix 3030. Het doel van de opvulling is zorgen dat verbrijzeling van de stam niet optreedt in de ingeklemde uiteinden. Bij de opvulling moet er expliciet rekening gehouden worden dat niet heel de stam gevuld wordt aangezien de epoxy louter als doel heeft om de inklemming te realiseren. Indien de epoxy te ver in de stam wordt gespoten zal deze mogelijk de treksterkte beïnvloeden, hetgeen ongewenst is. Figuur 15 toont een afbeelding van opgepaste proefstukken met epoxy.



Figuur 15: Proefstukken gevuld met epoxy

Tijdens vullen van de proefstukken is gebleken dat er niet verder gewerkt kan worden met deze oplossing aangezien de volgende uitvoerende problemen optreden:

- voor kleine proefstukken is de stam gevuld met witte sponsachtige vezels die beletten dat de epoxy diep genoeg aangebracht kan worden;
- de kleine diameters zorgen ervoor dat de spuitmond niet in de bamboe geraakt;
- het aanbrengen van de epoxy gebeurt met een kitpistool die werkt op perslucht. Door de vermenging van epoxy en perslucht is de hoeveelheid ingebrachte epoxy onvoldoende om de stam volledig op te vullen;
- door de krachten van het pneumatische kitpistool splijt het proefstuk.

Omwille van de opgetreden problemen bij het opvullen van de proefstukken worden conceptoplossing 2 (opvulling stam met epoxy + laag epoxy rond buitenoppervlak) en 3 (opvulling stam met epoxy + laag epoxy rond buitenoppervlak in combinatie met staaldraad) niet verder getest vanwege de analogie met conceptoplossing 1. Het enige verschil met oplossing 1 is dat er bijkomende oplossingen worden voorgesteld om slip tijdens de trekproef te beperken en vermijden.

- *Voorgestelde oplossingen*

Tijdens de praktische uitvoering is gebleken dat de voorgestelde oplossingen in de literatuur praktisch niet uitvoerbaar zijn bij kleine proefstukken. Hierdoor is er in samenspraak met de promotor en labobegeleider een oplossing voorgesteld door uitwendig op de proefstukken een cilinder van epoxy te voorzien zoals zichtbaar in Figuur 16.



Figuur 16: Uitwendige cilinder van epoxy rond proefstuk

Voor het aanbrengen van de epoxy is er gebruik gemaakt van PVC moffen met een inwendige diameter van 20 mm en een lengte van 49 mm. Hierbij is het belangrijk dat de proefstukken centraal in de mof komen te staan tijdens de uitharding. Dit is mogelijk gemaakt door aan de boven- en onderzijde van de mof een sluitring te plaatsen. Om niet met extra kosten te zitten en om op een snelle manier de sluitringen te verkrijgen is ervoor gekozen om deze op maat te laten laseren uit een spaanplaat in de *Makerspace*. Voor de inwendige diameter van de sluitring is 11,5 mm gekozen. Dit is namelijk de maximale diameter van de proefstukken waardoor er nagenoeg geen bewegingsruimte overblijft voor de proefstukken tijdens het uitharden.

Bij de uitvoering van deze uitwendige cilinders bestaat het gevaar dat er onvoldoende wrijving of hechtcapaciteit aanwezig is met de proefstukken. Om dit mogelijk probleem op te lossen zijn er drie verschillende typen proefstukken voorbereid om de effectiviteit hiervan te testen. Voor het eerste type werd er geen verbetering uitgevoerd. Voor het tweede type zijn er willekeurige gaten geboord in de proefstukken ter hoogte waar de epoxy komt. Het doel hiervan is om de epoxy deels in het proefstuk te laten vloeien via deze gaten. De diameter van deze gaten bedroeg 2 mm. Voor het derde type is er een staaldraad van met een diameter van 0,7 mm gewikkeld rond de proefstukken. Figuur 17 en 18 geven respectievelijk weer hoe de voorgestelde oplossingen er uitzien.



Figuur 17: Proefstuk versterkt met staaldraad



Figuur 18: Proefstuk met geboorde gaten

Voor alle proefstukken is de voorbereiding van de eindversteving goed gelukt met uitzondering van één proefstuk. Bij het verwijderen van de PVC-mof viel het op dat de epoxy nog niet volledig uitgehard was. Dit is een atypisch gegeven aangezien de epoxy bij een temperatuur van 5°C reeds op 24 uur uitgehard moet zijn. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de epoxy onvoldoende gemengd was voor gebruik of dat dit het laatste van de bus was. De gebruikte epoxy is een twee-componenten epoxy. Hierbij is het belangrijk dat er een goede vermenging optreedt tussen de twee afzonderlijke componenten voorafgaand aan het gebruik. Mogelijk is er onvoldoende vloeï doorheen de spuitmond toegelaten geweest met als gevolg dat de componenten onvoldoende vermengd werden. Hierdoor zijn er problemen met betrekking tot de uitharding opgetreden.

Tijdens het testen van de trialproefstukken volgde dat er bij alle voorgestelde oplossingen onvoldoende hechtsterkte aanwezig was tussen de eindverankering en de proefstukken zelf. Door het gebrek aan verankering worden de proefstukken uit de epoxy getrokken. Hierdoor is het niet mogelijk om de proefstukken te belasten totdat er een breuk optreedt.

### 5.3.2 Trekproef

Volgens NBN ISO 22157 moet de treksterkte van bamboe evenwijdig aan de vezelrichting gemeten worden aan de hand van strips die verkregen worden door de kolom te splijten. Allereerst is de volledige kolom in stukken van 28 cm gezaagd met behulp van een afkortzaag. Deze lengte volgt uit de geometrische kenmerken van de trekmachine waarbij er rekening gehouden is met een inklemming van respectievelijk 100 mm aan de boven en onderzijde van het proefstuk en een vrije lengte van 80 mm gelegen tussen beide inklemmingen.

In de volgende fase is de stam gespleten met behulp van een centerpons dewelke zichtbaar is in Figuur 19.

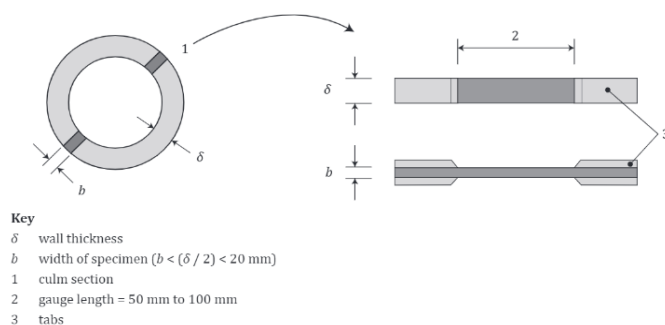


Figuur 19: Gebruikte centerpons om de bamboestokken te splijten

Met behulp van de centerpons was het mogelijk om de bamboestokken te splijten in drie à vier delen waarbij de splijting gebeurde volgens de vezelrichting. Hierdoor ontstaan er strips die eenzelfde afmeting vertonen van de boven tot de onderzijde. Ondanks deze splijting konden de proefstukken nog niet gebruikt worden in de trekmachine aangezien deze nog over te veel ronde zones beschikten. Dit is opgelost door de afzonderlijke delen nogmaals te splijten met behulp van een afbreekmes. Hierbij ontstond het probleem dat de splijting minder gecontroleerd kon worden en bijgevolg niet meer volledig volgens de vezelrichting gebeurde. Hierdoor vertoonden de afmetingen van de proefstukken in de lengterichting enige variabiliteit en was er een minimale beschadiging van de vezels aanwezig.

Zoals zichtbaar in Figuur 20 moeten er volgens NBN ISO 22157 *tabs* van zachthout aangebracht worden aan de uiteindes die ingeklemd worden in de trekmachine.





Figuur 20: Opbouw proefstuk trekproef volgens NBN ISO 22157 [15]

Voor de klaargemaakte proefstukken was het vanwege de beperkte afmetingen nagenoeg niet mogelijk om hier aan beide zijden nog tabs aan te brengen. Figuur 21 geeft een beeld van de klaargemaakte strips terwijl in Tabel 8 de proefstukken samen met hun afmetingen worden weergegeven.



Figuur 21: Proefstukken trekproef

Tabel 8: Geometrische kenmerken proefstukken trekproef

Identificatie	Nummer	Breedte [mm]	Diepte [mm]
f,t,N,1	1	3,94	2,65
	2	2,82	3,7
	3	2,75	4,5
f,t,N,2	1	3,87	2,49
	2	4,72	2,66
	3	3,37	2,38
	4	5,01	2,79
g,t,N,3	1	3,6	2,43
	2	4,3	2,79
	3	5,37	2,29
g,t,N,4	1	4,85	2,49
	2	4,11	2,14
	3	4,83	2,61
	4	4,57	2,08
	5	4,75	2,32
h,t,D,3	1	5,85	2,61
	2	5,03	2,69
	3	5,87	2,75
Dummy	1	6,3	2,05

In tabel 8 is het zichtbaar dat er verschillende proefstukken zijn verkregen bij dezelfde identificatie. Dit komt doordat de proefstukken oorspronkelijk klaargemaakt waren om te testen, maar deze zijn nadien toch niet uitgevoerd. Om niet nieuwe proefstukken te moeten zagen, zijn deze proefstukken op deze manier gerecycleerd aangezien deze onbeschadigd waren en over de correcte lengte van 28 cm beschikten. Specifiek voor de identificatie staat de eerste letter staat voor de bamboestok die gebruikt is. De proefstukken die met dezelfde letter beginnen zijn verkregen uit dezelfde bamboestok. De tweede letter staat voor de soort proef die uitgevoerd is. De letter t staat voor “trekproef”. De letter N of D geeft weer of de bamboestok respectievelijk in natte of droge toestand beproefd zou worden. Tot slot is er nog een cijfer meegegeven, dit was om een onderscheid te maken tussen de proefstukken die van dezelfde bamboestok komen. Aangezien de proefstukken gerecycleerd zijn, zijn de identificaties ook overgenomen om op deze manier te vermijden dat de gegevens van de proefstukken verloren zouden gaan.

Oorspronkelijk was het de bedoeling om 20 trekproeven uit te voeren waarbij er vier variaties waren, namelijk:

- 5 proeven aan werkelijke vochtigheid zonder knoop in het midden;
- 5 proeven aan werkelijke vochtigheid met knoop in het midden;

- 5 proeven aan een verlaagde vochtigheid (gedroogd) zonder knoop in het midden;
- 5 proeven aan een verhoogde vochtigheid (verzadigd) zonder knoop in het midden.

Voor het uitvoeren van deze proeven zou er gebruikgemaakt worden van de volledige stam in plaats van strips. Wegens problemen met betrekking tot de eindverankering worden deze verder niet uitgevoerd. Om te beginnen is het niet gewenst om de proefstukken gedurende een bepaalde termijn te drogen in een droogoven na het aanbrengen van de epoxy. Zo is het mogelijk dat de werkzaamheid van de eindversteving daalt en dat er schadelijke stoffen vrijkomen door het langdurig verhitten van de epoxy. Een oplossing hiervoor zou eventueel zijn om de epoxy aan te brengen na de droging. Echter zal hierdoor de effectiviteit van de droging afnemen waardoor het beter is om deze proef achterwege te laten.

De versteving van de eindzones biedt in het algemeen problemen voor alle proefstukken. Indien de proefstukken verzadigd worden met water zullen deze bijgevolg opzwellen en in vochtgehalte toenemen tot meer dan 100% (zie 6.2 Vochtabsorptie en droging). Als gevolg hiervan is het te verwachten dat de versteving in de eindzones effectiviteit zal verliezen omdat een toename in vochtigheid gepaard gaat met een verlies in sterkte voor zowel de longitudinale, radiale en tangentiële richting. Omwille van deze reden wordt ook deze proef achterwege gelaten.

Uitvoeren van deze proeven op strips is een mogelijkheid. Echter worden deze proeven niet uitgevoerd aangezien het niet mogelijk is om de resultaten met voldoende nauwkeurigheid te kunnen analyseren. Zo is het noodzakelijk om de densiteit en vochtgehalte van de strips te kennen in zowel droge als natte toestand. Dit wordt berekend door de massa's te wegen en het volume van de proefstukken te bepalen. De massa bepalen zorgt niet voor problemen, maar het bepalen van de dimensies wel aangezien de doorsnede niet volledig rechthoekig is. Bijkomend is er ook een zekere kromming aanwezig. Aangezien de dimensies van de proefstukken zo klein zijn zorgt een minimale meetfout reeds voor een grote afwijking in de resultaten.

### 5.3.3 Uittrekproef

Voor de uittrekproef worden de bamboestokken gezaagd in stukken van 33 cm met behulp van afkortzaag. Het verkrijgen van stukken van 33 cm zonder knoop was niet mogelijk aangezien de knopen hiervoor te dicht op elkaar volgden. Bij de proefstukken waarbij geen knoop gewenst was in het beton is er besloten om toch een knoop te voorzien in de ruimte tussen het beton en de inklemming zoals zichtbaar in Figuur 22.



Figuur 22: Proefstuk uittrekproef zonder knoop in het beton

Zoals zichtbaar in Figuur 22 is er een knoop aanwezig in het proefstuk na 17 cm. Deze heeft echter geen invloed op het resultaat van de uittreksterkte aangezien deze zich in de vrije ruimte tussen het beton en de inklemming bevindt. Dit komt doordat de hoogte van de betonkubussen slechts 15 cm bedraagt. In het geval van de proefstukken waarbij een knoop in het midden van de betonkubus aanwezig is, is er geen knoop aanwezig in de ruimte tussen de betonkubus en de inklemming.

Tabel 9 geeft een overzicht van de verschillende uittrekproeven die worden uitgevoerd.

Tabel 9: Aantal proeven per variant voor de uittrekproef

Uittrekproef	Zonder knoop in beton Geen behandeling	5
	Met knoop in beton Geen behandeling	5
	Zonder knoop in beton Behandeling: bitumen	5
	Zonder knoop in beton Behandeling: bitumen + zand	5
	BE500 Diameter 10 mm	3

Zoals zichtbaar in Tabel 9 waren in totaal 23 betonkubussen nodig om alle proeven uit te voeren. Er was gekozen om te werken met kubussen van 15 x 15 x 15 cm in plaats van cilinders van 30 cm met een diameter van 15 cm. Eigenschappen over de gebruikte betonsamenstelling kunnen geraadpleegd worden in 5.2 Samenstelling betonmengsel.

Bij het uitharden van het beton kunnen er problemen optreden met betrekking tot het rechthouden van de bamboestokken. Beton in vloeibare toestand biedt mogelijk onvoldoende weerstand om de stokken recht te houden. Hierdoor worden additionele steunelementen voorzien zodanig dat de ligging van de stokken geen afwijking vertoont ten opzichte van de verticale as.

Om de bamboestokken recht te houden tijdens het droogproces is er gebruikgemaakt van een houten plaat met op maat gemaakte gaten boven de betonkubussen ter ondersteuning. Vooraleer deze plaat gemaakt kon worden, zijn eerst alle mallen voor de betonkubussen in elkaar gezet. Vervolgens zijn alle kubussen zo compact mogelijk op twee houten paletten geplaatst. In de volgende fase is de ondersteunende houten plaat op maat gemaakt. Hiervoor zijn vier poten van 25 cm gezaagd om de houten plaat 8 cm boven de kubussen te plaatsen. Door deze op een zekere afstand boven de kubussen te plaatsen, wordt het droogproces niet beïnvloed. Hierna is een houten plaat op deze poten gemonteerd. Vervolgens is het middelpunt van iedere betonkubus aangeduid, waarna ieder gat geboord is met een diameter van 11,5 mm. Figuur 23 geeft het resultaat van de voorbereide plaat weer.



Figuur 23: Plaat ter ondersteuning bamboestokken tijdens uitharden beton

Zoals zichtbaar in Figuur 23 zijn de betonkubussen op dit moment van de voorbereiding nog niet gevuld met beton. Bijkomend is het vanwege de beperkte boordiameter niet mogelijk om de bamboestokken langs de bovenzijde in de ondersteuning te steken omwille van de aanwezigheid van knopen. Hierdoor moeten de proefstukken dus vooraf ingebracht worden langs de onderzijde van de plaat. Dit gegeven zorgt er dus voor dat de plaat mobiel moet zijn. Door gebruik te maken van een mobiele plaat ontstaat het gevaar dat de boorgaten niet meer exact in het verlengde van het middelpunt van de betonkubussen

komen te liggen. Om dit effect te vermijden is de ligging van de vier poten aangeduid zodat de plaat altijd terug in zijn oorspronkelijke positie geplaatst kan worden.

Bij het klaarmaken van de proefstukken is gebleken dat de betonsamenstelling te viskeus was om de proefstukken in het beton te steken. Hierdoor was het noodzakelijk om de proefstukken in te brengen met behulp van rotatie en zijwaartse bewegingen. Door deze bewegingen ontstond er een opening in het beton waardoor de verdichting niet optimaal was. Dit werd opgelost door het beton manueel te verdichten en te trillen met een trilnaald.

#### 5.3.4 Buigproef

Voor de buigproef zijn tien proefstukken voorbereid met een lengte van 45 cm. Hierbij beschikten vijf proefstukken over een knoop in het midden en vijf proefstukken hadden geen knoop in het midden. Op basis van de geometrische kenmerken van de bamboestokken was het niet mogelijk om proefstukken te voorzien zonder aanwezigheid van een knoop. Echter is het geen probleem indien de knopen zich tussen het belastingspunt en de oplegpunten bevinden aangezien er geen maximale kracht zal ontwikkelen ter hoogte van dit punt.

#### 5.3.5 Densiteit

Proefstukken worden gemaakt op basis van het doorzagen van de bamboestokken. Gemiddeld gezien werden uit elke stok twee à drie proefstukken verkregen waarbij er bijgevolg een zekere rest overbleef van elke stok. Met behulp van deze rest wordt de densiteit bepaald van iedere stok.

De dimensies van de resten zijn niet belangrijk aangezien deze geen invloed hebben op het resultaat. Echter is het wel belangrijk dat knopen afwezig zijn bij deze elementen aangezien het volume bepaald wordt aan de hand van de dimensies zoals inwendige diameter, uitwendige diameter en lengte. De exacte dimensies van de knopen zijn moeilijk te bepalen waardoor deze zorgen voor een onnodige onzekerheid en afwijking op het exacte resultaat. Tijdens het meten van de proefstukken is gebleken dat de inwendige en uitwendige diameter ovaal zijn. Om deze vorm in rekening te brengen is het gemiddelde genomen tussen de maximale en minimale diameter die gevonden wordt voor zowel de inwendige als uitwendige diameter. Aan de hand van de gemeten dimensies is de oppervlakte van iedere doorsnede bepaald. Om deze berekening te maken zijn er twee opties, namelijk:

Op basis van de formule uit NBN ISO 22156 [52, p. 23]:

$$A = \frac{\pi}{4} * [D^2 - (D - 2 * \delta)^2] \quad (9)$$

Waarbij:

- D = uitwendige diameter [mm]
- $\delta$  = wanddikte [mm]

Op basis van de gekende oppervlakteformule:

$$A = \frac{\pi}{4} * [D_{\text{uitwendig}}^2 - D_{\text{inwendig}}^2] \quad (10)$$

Waarbij:

- $D_{\text{uitwendig}}$  = uitwendige diameter [mm]
- $D_{\text{inwendig}}$  = inwendige diameter [mm]

Voor het bepalen van de oppervlakte maakt het niet uit welke formule gebruikt wordt aangezien beide hetzelfde resultaat geven. Het gebruik van formule twee is sneller in gebruik aangezien de wanddikte van de proefstukken niet bepaald zijn. Deze kan berekend worden op basis van het verschil tussen de uitwendige en inwendige diameter.

Bijkomend is de massa van ieder proefstuk gewogen met een weegschaal waarbij de nauwkeurigheid 0,1 g bedroeg.

### 5.3.6 Vochtabsorptie

Voor het bepalen van de vochtabsorptie zijn er vijftien proefstukken klaargemaakt. Hierbij bezitten vijf proefstukken geen knoop, vijf proefstukken één knoop en vijf proefstukken twee knopen. De lengte van de proefstukken met zowel één als twee knopen bedraagt 35 cm. Voor de proefstukken zonder knoop bedraagt deze 28 cm. De lengte van deze proefstukken is kleiner genomen omdat het niet mogelijk was om vijf proefstukken te verkrijgen waarbij 35 cm beschikbaar is tussen de knopen.

De bepaling van de initiële massa's van de proefstukken gebeurt met de weegschaal in het Technologicentrum. Deze weegschaal heeft een nauwkeurigheid van 0,1 g. Gedurende de looptijd van de proef worden de proefstukken dagelijks thuis gemeten. De weegschaal thuis beschikt evenzeer over een nauwkeurigheid van 0,1 g. Ter controle van de massa's worden de proefstukken op dag nul zowel in het Technologicentrum als thuis gemeten. Uit deze controlemetingen volgt dat de massa's van tien proefstukken thuis 0,1 g zwaarder zijn. De overige vijf proefstukken wegen exact evenveel. Om de foutenmarge op de resultaten zo veel mogelijk te beperken worden de metingen in het Technologicentrum achterwege gelaten.

## 5.4 Uitvoering proeven

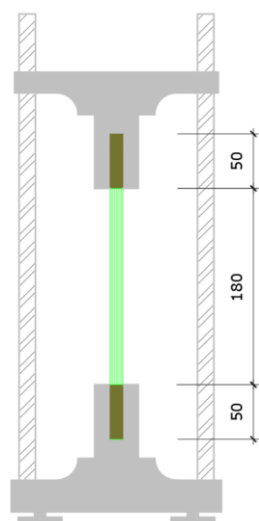
In onderstaande delen wordt de uitvoering van zowel trialtest, trekproef, uittrekproef, buigproef en de bepaling van het vochtgehalte besproken. Hierbij worden onder andere de afmetingen, belastingssnelheid en (proef)opstelling aangehaald.

### 5.4.1 Uitvoeren trialtest

Er zijn 5 trialtesten uitgevoerd om te controleren of de eindverankering voldoende sterkte biedt voor het uitvoeren van de trekproef. De volgende drie soorten proefstukken zijn getest geweest:

- 1 proef met een cilinder van epoxy zonder bijkomende versteviging aan beide uiteinden;
- 2 proeven met een cilinder van epoxy en extra geboorde gaten van 2 mm aan beide uiteinden;
- 2 proeven met een cilinder van epoxy en versteviging met een staaldraad van 0,7 mm aan beide uiteinden.

Voor alle proefstukken zijn de grootte van de met epoxy gevulde cilinders even groot en gelijk aan 50 mm. Om de inklemming van deze ronde cilinders mogelijk te maken wordt er gebruikgemaakt van grips die V-vormig zijn (*V-shaped grips*). Voor de testsnelheid wordt er naar analogie met de literatuur gekozen voor 10 mm/min [27]. Figuur 24 en 25 geven weer hoe de proefopstelling er uitziet.



Figuur 24: Schets proefopstelling trekproef



Figuur 25: Proefopstelling trekproef labo

Uit de trialtesten volgde dat de hechting tussen de cilinders van epoxy en de bamboestokken onvoldoende is om de stokken te kunnen testen tot de gewenste faalmodus. In eerste instantie scheurt de epoxy aan de buitenzijde doordat de bamboe aan de binnenzijde samengedrukt wordt door de inklemming. Vervolgens treedt er slip op tussen de epoxy en de bamboe waardoor er geen kracht volgens de vezelrichting van de stokken wordt waargenomen. Door het falen van de hechting werd bij geen enkele trialtest een waarde verkregen die in de buurt komt van de sterktes uit de literatuur.

Vervolgens zijn er nog bijkomende trialproeven uitgevoerd op rechthoekige bamboestrips zoals beschreven in 5.3.2 Trekproef. Bij het gebruik van V-vormige grips raken de proefstukken beschadigd ter hoogte van de inklemming waardoor de maximale trekkracht niet kan worden bereikt. Hierdoor zijn de V-vormige grips vervangen door platte grips waarbij dit probleem niet optreedt.

#### 5.4.2 Uitvoeren trekproef

Er zijn negentien trekproeven uitgevoerd op bamboestrips zoals beschreven in 5.3.2 Trekproef. Bijkomend zijn er ook drie trekproeven uitgevoerd op wapeningsstaal BE500 met een diameter van 10 mm om een vergelijking te maken tussen bamboe en wapeningsstaal.

Na de succesvolle proeven op bamboestrips zijn ook deze uitgevoerd aan een snelheid van 10 mm/min. De snelheid van testen bij staalwapening werd bepaald door de trekmachine zelf. Op basis van de resultaten van de testen bedroeg de gemiddelde snelheid 0,22 mm/min

Om meetfouten bij de proefstukken te beperken wordt er stevast een kracht aangebracht. Deze kracht bedroeg 200 N voor de bamboestrips en 350 N voor de staalwapening. Na het aanbrengen van de voorspanning is de E-modulus van ieder proefstuk gemeten met behulp van een extensometer.

Voor het uitvoeren van de proeven op bamboestrips is er gebruikgemaakt van platte grips (zie Figuur 26) terwijl er voor de proeven op staal V-vormige grips (zie Figuur 27) nodig waren om de inklemming mogelijk te maken. Tabel 10 geeft een overzicht van de hierboven beschreven parameters weer.

Tabel 10: Parameters trekproef

Trekproef			
Materiaal	Snelheid [mm/min]	Voorspanning [N]	Type grips
Bamboe	10	200	Flat
Staal	0,22	350	V-shape



Figuur 26: Platte grips voor bamboestrips



Figuur 27: V-vormige grips voor staalwapening

### 5.4.3 Uitvoeren uittrekproef

Er zijn twintig uittrekproeven uitgevoerd in vier verschillende varianten. Bijkomend zijn er ook drie uittrekproeven uitgevoerd op staal om referentiemetingen te verkrijgen.

De uittrekroef is uitgevoerd in een trekbank waarbij de betonkubus aan de onderzijde wordt vastgemaakt met behulp van metalen klemmen. Figuur 28 geeft weer hoe deze inklemming eruitzagt.



Figuur 28: Proefopstelling uittrekproef labo

In Figuur 28 is het zichtbaar dat de kubus niet vlak op de ondersteunende plaat is gezet. Door beperkte scheefstand van de proefstukken was het noodzakelijk om de kubussen schuin in te klemmen zodanig dat de kracht die uitgevoerd werd op de proefstukken, een loodrecht aangrijpingspunt had.

De gehanteerde snelheid voor de beproeving was verschillend voor de proefstukken van bamboe en staal. Zo werd er bij de proefstukken van bamboe aan 10 mm/min getrokken totdat er slip optrad in het beton. Vanaf dat moment werd de proef voortgezet met een snelheid van 50 mm/min. Voor de proefstukken met staal werd steeds 20 mm/min gehanteerd.

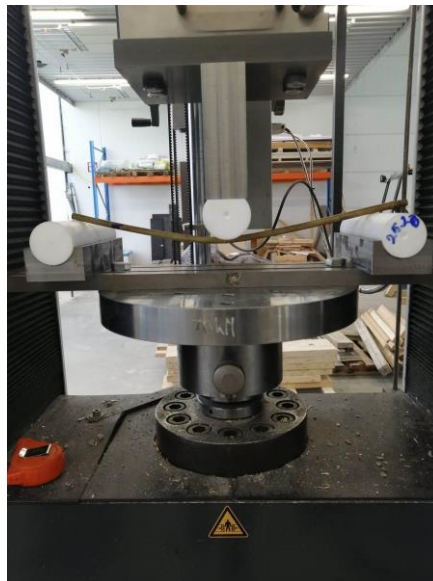
Na de succesvolle proeven zijn de onbehandelde proefstukken (met als zonder knoop) gewogen en vervolgens in een droogoven op 105°C gestopt. Met behulp van de meting vlak na de proeven, is het op deze manier mogelijk om de toename in vochtgehalte te berekenen.

Buiten de uittrekproeven zijn er ook drukproeven uitgevoerd op acht betonkubussen om de mechanische eigenschappen van het gebruikte betonmengsel te vergelijken met de sterktewaarden die verwacht worden op basis van berekeningen. Voor de drukproeven is er gewerkt met een kracht van 0,6 MPa/s. Rekening houdend met de dimensies van de kubussen (15 x 15 x 15 cm) komt dit neer op een kracht van 13,5 kN/s.

#### 5.4.4 Uitvoeren buigproef

Voorafgaand aan de buigproef op de tien proefstukken zijn er twee trialproeven uitgevoerd om de belastingssnelheid vast te leggen. Zo is er bepaald dat een belastingssnelheid van 20 mm/min nodig was om de proefstukken binnen een redelijke termijn te doen falen.

De buigproef werd uitgevoerd als een driepuntsbuigproef met een tussenafstand van 40,7 cm van steunpunt tot steunpunt. Figuur 29 geeft weer hoe de proefopstelling er uitzag in het labo.



Figuur 29: Proefopstelling buigproef labo

Er werden vijf buigproeven uitgevoerd op proefstukken zonder een knoop in het midden van de overspanning en vijf met een knoop in het midden. Hierbij is er gekeken naar de maximale buigspanning en de verticale verplaatsing / doorbuiging van de proefstukken.

#### 5.4.5 Uitvoeren proef vochtgehalte

Er zijn dagelijks metingen uitgevoerd om de evolutie van het vochtgehalte te monitoren. Figuur 30 geeft weer hoe de proefstukken eruitzagen gedurende de volledige termijn van de test.





Figuur 30: Proefstukken vochtabsorptie in een waterbak

Voor de frequentie van de metingen zijn er de eerste dag drie metingen uitgevoerd. Van dag 2 tot en met 8 zijn er twee metingen per dag uitgevoerd. Vanaf dag 8 is er dagelijks slechts één meting uitgevoerd doordat het resultaat van de metingen begint minder variatie vertoont dan de dagen voordien. De metingen zijn uitgevoerd tot en met dag 28. Het stoppen van de metingen is vastgelegd op het moment dat er geen toename in volume meer werd waargenomen.

Vanaf dag 28 zijn de proefstukken gedurende vijf dagen gedroogd op kamertemperatuur. Hierna zijn de proefstukken nog drie dagen gedroogd in een droogoven van 105°C om zo de droge massa zonder vocht van de proefstukken te meten.

## 6 Resultaten en discussie

### 6.1 Densiteit

Voor het berekenen van de densiteit is er gebruik gemaakt van de Formule 11:

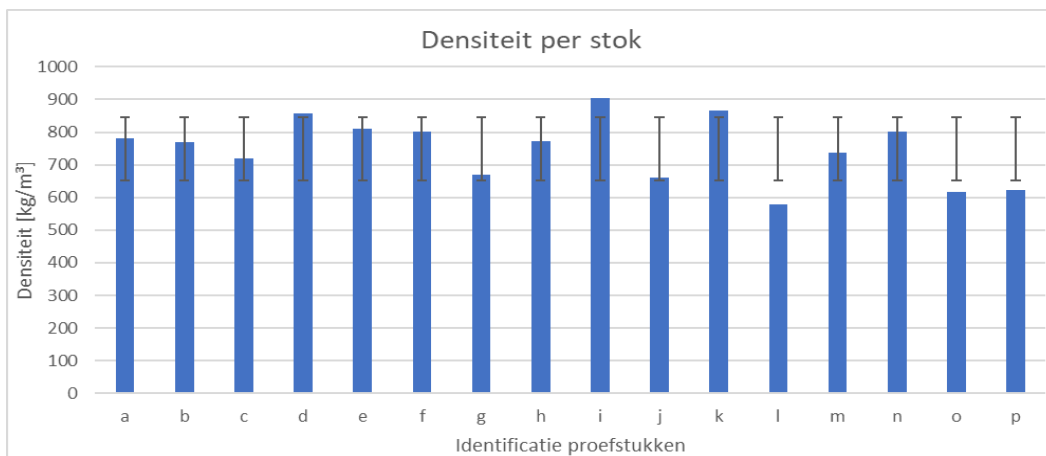
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (11)$$

Waarbij:

- $m$  = massa [kg]
- $V$  = volume [m<sup>3</sup>]

De proefstukken voor de trekproef en uittrekproef zijn gemaakt uit zestien verschillende bamboestokken. Hierdoor wordt de densiteit van deze zestien bamboestokken bepaald. Deze bamboestokken krijgen elk hun specifieke identificatie mee, van de letter a t.e.m. p. Echter, door aanpassing van de uit te voeren proeven komen niet alle proefstukken waarvan de densiteit is bepaald, terug in de trek- of uittrekproeven. Dit heeft geen implicaties op het resultaat van de densiteit, maar zorgt er wel voor dat variaties in de densiteit niet verbonden kunnen worden aan afwijkingen bij de proeven.

Nadat de massa voor ieder proefstuk bepaald is, zijn de resultaten omgezet in een grafiek. Het resultaat hiervan is zichtbaar in Figuur 31.



Figuur 31: Berekende densiteit per stok met foutenbalken

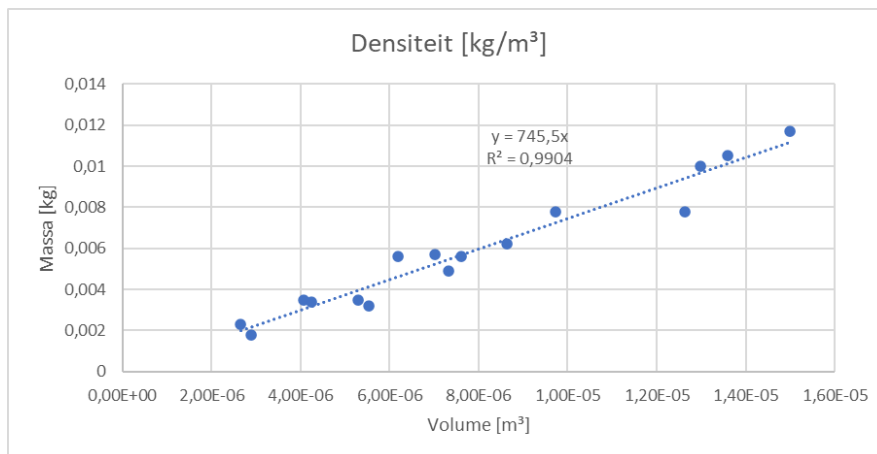
Figuur 31 toont aan dat de densiteit van de proefstukken a t.e.m. p gelegen is tussen 579 en 904 kg/m<sup>3</sup>. Bijkomend toont Figuur 31 aan dat de bekomen densiteit voor stok d, l, o en p buiten de som of het verschil valt van de gemiddelde densiteit en de standaarddeviatie. Ondanks de uiteenlopende resultaten bedraagt de gemiddelde densiteit 748 kg/m<sup>3</sup>. Dit resultaat is in overeenstemming met de literatuur aangezien de densiteit van bamboe gelegen is tussen 560 en 960 kg/m<sup>3</sup> [30]. Vervolgens wordt er een statistische analyse uitgevoerd. Het resultaat is zichtbaar in Tabel 11.

Tabel 11: Statistische resultaten densiteit

	Densiteit
$\mu$	748
$\sigma$	96
CV	13%

Uit Tabel 11 volgt dat er een standaardafwijking van  $96 \text{ kg/m}^3$  zit op het gemiddeld resultaat van  $748 \text{ kg/m}^3$ . Ondanks deze grote standaardafwijking, is het resultaat volgens de verwachting. Zo is bamboe een natuurlijk materiaal en bijgevolg ook heterogeen. Op basis van deze eigenschap is een variatie in de resultaten te verwachten.

Bijkomend is het resultaat van de densiteit gevisualiseerd in een spreidingsdiagram. Dit is zichtbaar in Figuur 32.



Figuur 32: Spreidingsdiagram resultaten densiteit

De richtingscoëfficiënt uit Figuur 32 bedraagt 745,5. Deze waarde is bij benadering gelijk aan het rekenkundig gemiddelde van  $748 \text{ kg/m}^3$ . Ook is er in Figuur 32 een correlatie zichtbaar tussen de verschillende meetresultaten. Dit wordt bevestigd door het resultaat van de determinatiecoëfficiënt  $R^2$  die 0,9904 bedraagt.

De verschillen in densiteit tussen de afzonderlijke proefstukken kunnen verklaard worden aan de hand van de gebruikte methodiek en geometrische eigenschappen van de bamboestokken. De bepaling van het volume is gebeurd met behulp van een rolmeter en schuifmaat. Hierbij werd de rolmeter uitsluitend gebruikt voor het bepalen van de lengte terwijl de schuifmaat gebruikt werd voor de inwendige en uitwendige diameters. De nauwkeurigheid van de metingen bedroeg 1 mm voor de lengtes en 0,05 mm voor de diameters. Het gewicht van de stokken is bepaald aan de hand van een weegschaal met een nauwkeurigheid van 0,1 g. Het gewicht van de proefstukken was gelegen tussen 11,7 en 1,8 gram. Bij deze lage massa's wordt het resultaat sterk beïnvloed door een beperkte nauwkeurigheid. De norm NBN ISO 22157 is ervan bewust dat een beperkte nauwkeurigheid invloed kan hebben op het resultaat. Zo stelt de norm dat de nauwkeurigheid van de meting minstens 0,5 % van de massa moet bedragen [15, p. 8].

Bijkomend is het mogelijk dat imperfecties in de bamboestokken zelf zorgen voor fouten in de resultaten. In enkele gevallen was de stam niet volledig hol maar beperkt gevuld met een witte sponsachtige materie. Het gewicht van deze materie wordt tijdens het wegen mee in rekening gebracht waardoor de totale massa van het proefstuk toeneemt. Verder was de inwendige en uitwendige diameter niet rond maar ovaal. Deze imperfectie werd in rekening gebracht door de gemiddelde diameter te bepalen. In veel gevallen waren de gemeten diameters aan één uiteinde niet gelijk aan de diameters van het andere uiteinde. Om dit op te lossen zijn de gemiddelde diameters voor elk uiteinde bepaald waarna het uiteindelijke gemiddelde aan de hand van deze twee waardes werd bepaald. Uit de literatuur volgt dat de diameter van een bamboestok afneemt van onder naar boven toe [6]. Op basis van deze bron is werken met een gemiddelde diameter een correcte aanname.

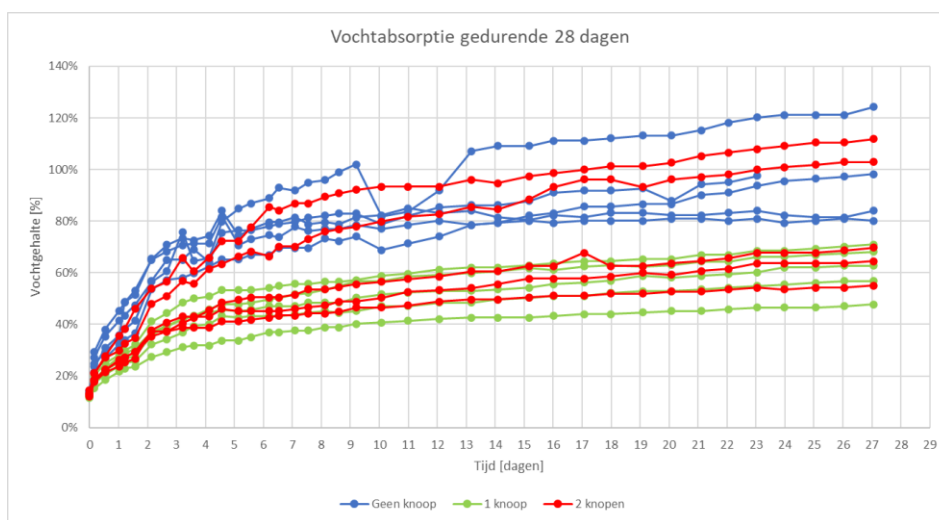
Voor bepaalde proefstukken is het mogelijk dat er te dicht langs de knopen is gezaagd. Dit heeft een invloed op het resultaat aangezien de densiteit ter hoogte van de knopen hoger is dan in de zones tussen de knopen [53]. Bijkomend kan dit ook de lage densiteit van bepaalde proefstukken verklaren. Voor de gemiddelde densiteit wordt er rekening gehouden met alle elementen van een staaf. Voor deze proef zijn de knopen buiten beschouwing gelaten aangezien de dimensies moeilijk bepaald kunnen worden. Hierdoor wordt de gemiddelde densiteit bijgevolg onderschat.

Een ander gegeven wat meespeelt bij de verschillen in resultaten is dat bamboe een natuurlijk materiaal is en bijgevolg dus heterogeen is. Dit heeft als gevolg dat er een variatie in eigenschappen verwacht wordt, wat ook waarneembaar is uit de resultaten en in Figuur 31 en 32.

Tot slot is het beter om het volume van kleine proefstukken te bepalen aan de hand van een volumetrische methode in plaats van een geometrische methode aangezien de invloed van meetfouten, imperfecties en aannames hier veel groter zal zijn. Via een volumetrische methode kan het volume na onderdompeling van het proefstuk bepaald worden aan de hand van het verplaatst volume aan vloeistof. Hierbij moet er rekening gehouden worden dat de densiteit van de vloeistof lager moet zijn dan die van bamboe. Indien dit niet het geval is zal onderdompeling niet optreden. Het contact met de vloeistof moet zo kort mogelijk gehouden worden in tijd zodanig dat de geabsorbeerde hoeveelheid aan vloeistof minimaal is.

## 6.2 Vochtabsorptie en droging

Zoals beschreven in 5.4.5 Uitvoeren proef vochtgehalte zijn de massa's van de proefstukken gedurende 28 dagen op regelmatige basis gemeten. Hierbij hadden vijf proefstukken geen knoop, vijf proefstukken één knoop en vijf proefstukken twee knopen. Figuur 33 geeft het resultaat van de metingen weer.



Figuur 33: Evolutie vochtabsorptie van ondergedompelde proefstukken

Uit Figuur 33 kan afgeleid worden dat de vochtabsorptie voor alle varianten aan een hoog tempo toeneemt maar naarmate dat de proefstukken naar verzadiging naderen zal het tempo afnemen. Op basis van de resultaten uit deze grafiek kan er geen exacte waarde afgeleid worden voor het moment dat verzadiging optreedt.

De maximaal optredende waarde van het vochtgehalte is variabel. Zo bevinden alle resultaten zich tussen een vochtgehalte van 48% en 124%. Waarden boven de 100% voor de vochtabsorptie zijn niet atypisch en komen voor in de literatuur [54].

Tot slot is er bij proefstuk UW3 zonder knoop een onverwacht resultaat zichtbaar. Op dag tien daalde het vochtgehalte van 102% naar 82%. Deze dalende trend was niet zichtbaar in de opeenvolgende dagen. Echter begon het vochtgehalte opnieuw te stijgen. Dit eigenaardig resultaat was op dezelfde dag in beperkte mate ook aanwezig in de resultaten van proefstukken UW1 en UW2.

Een mogelijke verklaring voor deze plotse daling kan verklaard worden doordat vocht boven het vezelverzadigingspunt vrij is kunnen komen. Vrij vocht is vocht dat niet wordt opgeslagen in de celstructuur zelf. Hierdoor bestaat de mogelijkheid dat het vrijgekomen is na blootstelling aan een plotse schokbelasting, zoals een val als gevolg van onvoorzichtig handelen.

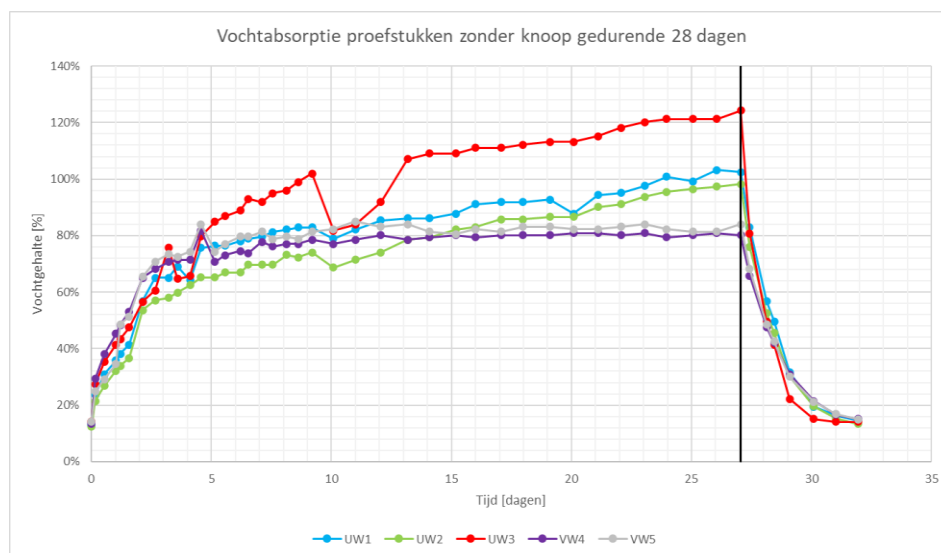
Vervolgens is er een statistische analyse van de resultaten uitgevoerd, afhankelijk van het type proef. Dit is zichtbaar in Tabel 12.

Tabel 12: Statistische analyse waterabsorptie

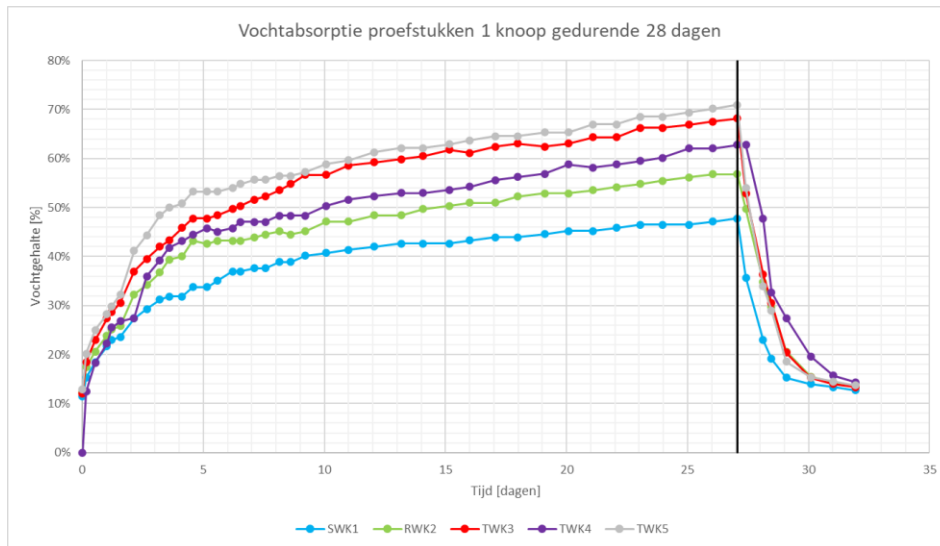
	Absorptie na 28 dagen		
	Geen knoop	1 knoop	2 knopen
$\mu$	98%	61%	81%
$\sigma$	17%	9,3%	25%
CV	18%	15%	31%

Uit de statistische analyse volgt dat het gemiddeld vochtgehalte bij de proefstukken zonder knoop (98%) aanzienlijk hoger ligt dan bij de proefstukken met één knoop (61%) en twee knopen (81%). Echter moet er bij de resultaten ook rekening gehouden worden met grootte van de variatiecoëfficiënt. Op basis van Figuur 33 wordt waargenomen dat er enige spreiding aanwezig is bij de proefstukken zonder knoop en de proefstukken met twee knopen. Opvallend hierbij is dat deze spreiding niet teruggevonden wordt bij de desbetreffende variatiecoëfficiënten, maar wel bij de standaarddeviaties. Bij de proefstukken zonder knoop is er één proefstuk dat een hogere waarde voor het vochtgehalte bereikt terwijl er bij de proefstukken met twee knopen twee proefstukken zijn die een hoger vochtgehalte bereiken. Dit verschil uit zich vervolgens in een verschillende standaarddeviatie voor beide types van proeven.

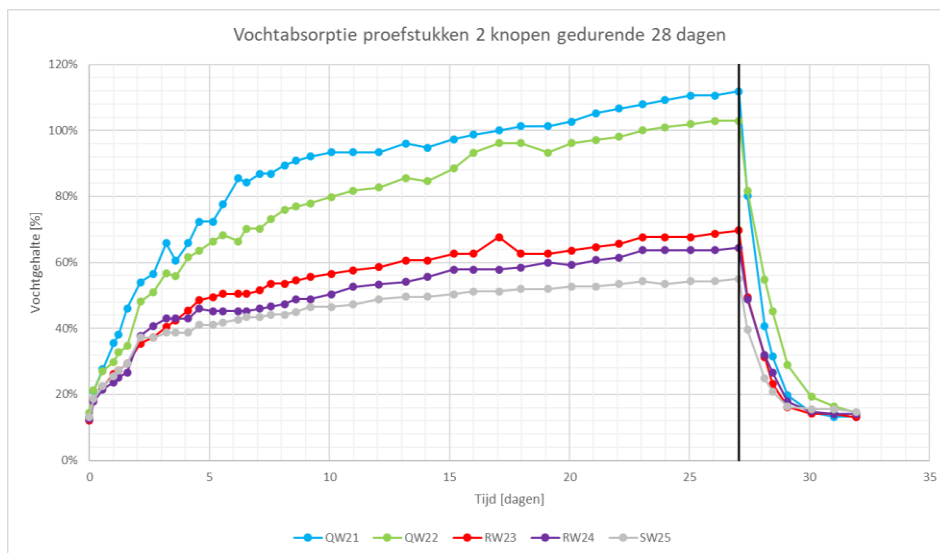
Tot slot liggen de gemiddelde waarden uit Tabel 12 in lijn met de verwachting op basis van de resultaten in Figuur 33. In de volgende fase worden de resultaten van de proefstukken meer in detail besproken in functie van het aantal aanwezige knopen. Figuur 34, 35, en 36 geven de resultaten weer. Bijkomend is ook het droogproces in lucht mee opgenomen in de figuren.



Figuur 34: Evolutie vochtabsorptie proefstukken zonder knoop



Figuur 35: Evolutie vochtabsorptie proefstukken met 1 knoop



Figuur 36: Evolutie vochtabsorptie proefstukken met 2 knopen

Uit Figuur 34 kan worden afgeleid dat het vochtgehalte van proefstukken UW1 en UW2 evenredig toeneemt totdat er na 28 dagen een maximaal vochtgehalte van respectievelijk 102% en 98% bereikt wordt. Dit evenredig gedrag wordt ook waargenomen bij proefstukken VW4 en VW5. Enkel bereikt het maximaal vochtgehalte bij deze proefstukken slechts 80% en 84%. Tot slot wordt er een anomalie waargenomen bij proefstuk UW3. Ondanks dat dit proefstuk van dezelfde stok komt als proefstuk UW1 en UW2, neemt het vochtgehalte toe tot 124%.

De variatie in de resultaten kan verklaard worden op basis van de dichtheid van de cellulosevezels in de stok. Op basis van [55] volgt dat de dichtheid van cellulosevezels aan de onderzijde groter is dan aan de bovenzijde. Door dit verschil in dichtheid is de ligging van cellulosevezels aan de bovenzijde minder compact waardoor de opname van vocht minder wordt afgeremd. Hierdoor bevatten de proefstukken die aan de bovenzijde van de stok gelegen zijn een groter vochtgehalte. Deze verklaring is echter hypothetisch aangezien de oorspronkelijke ligging van de proefstukken in de kolom onbekend is. Figuur 37 geeft de weer hoe proefstukken UW1, UW2 en UW3 eruitzien.



Figuur 37: Proefstuk UW1, UW2 en UW3

Op basis van een visuele inspectie kan de ligging van de proefstukken in de oorspronkelijke stok niet achterhaald worden. Door de proefstukken te meten volgt dat proefstuk UW3 over de kleinste dwarsdoorsnede en wanddikte beschikt. Hierdoor kan er geconcludeerd worden dat de ligging van UW3 hoger van de grond was gelegen ten opzichte van proefstuk UW1 en UW2. Specifiek voor deze proefstukken is de stelling van [55] geldig.

In Figuur 35 is er een corresponderende trend zichtbaar bij alle proefstukken. Tussen het startpunt van de metingen en 36 uur na aanvang is de toename in vochtgehalte evenredig voor alle proefstukken. Tussen 36 uur en 4 dagen na aanvang treedt er meer variatie op waardoor de curves enige dissociatie beginnen te vertonen. Ondanks de dissociatie van de verschillende curves, neemt het vochtgehalte van de proefstukken wel evenredig toe waardoor er evenwijdige plateaus voor de proefstukken waargenomen worden.

Bijkomend zijn er verschillen zichtbaar tussen de proefstukken met en zonder knoop (zie Figuur 34 en 35). Bij de proefstukken zonder knoop is het vochtgehalte na 28 dagen gelegen tussen 80% en 124% terwijl deze voor de proefstukken met één knoop gelegen is tussen 48% en 71%. Het verschil in vochtgehalte kan verklaard worden door de aanwezigheid van een knoop. In een bamboestok bezitten de knopen de hoogste dichtheid. Door deze hoge dichtheid is de indringing van vocht in de zone van de knoop eerder beperkt. Gezien de beperkte massa's van de proefstukken, (allemaal gelegen tussen 7,6 g en 15,7 g bij een vochtgehalte van 0%) zal een limitatie in vochtabsorptie door aanwezigheid van de knopen resulteren in een lager gemiddeld vochtgehalte.

In Figuur 36 is net zoals in Figuur 34 een analoog gedrag zichtbaar tussen proefstukken die verkregen zijn uit dezelfde stok, namelijk tussen QW21 en QW22 en tussen RW23 en RW24. Ondanks dat het gedrag tussen proefstukken uit dezelfde stok enige gelijkheid vertonen, zijn er opmerkelijke verschillen in vochtgehalte zichtbaar tussen de verschillende stokken onderling. De verhouding in vochtgehalte tussen proefstukken uit stok Q en stok R bedraagt factor 2. Figuur 38 geeft de weer hoe proefstukken van stok Q en R eruitzien terwijl Figuur 39 weergeeft hoe de doorsnede van de proefstukken eruitziet.



Figuur 38: Proefstuk QW21, QW22, RW23 en RW24



Figuur 39: Doorsnede proefstuk QW21, QW22, RW23 en RW24

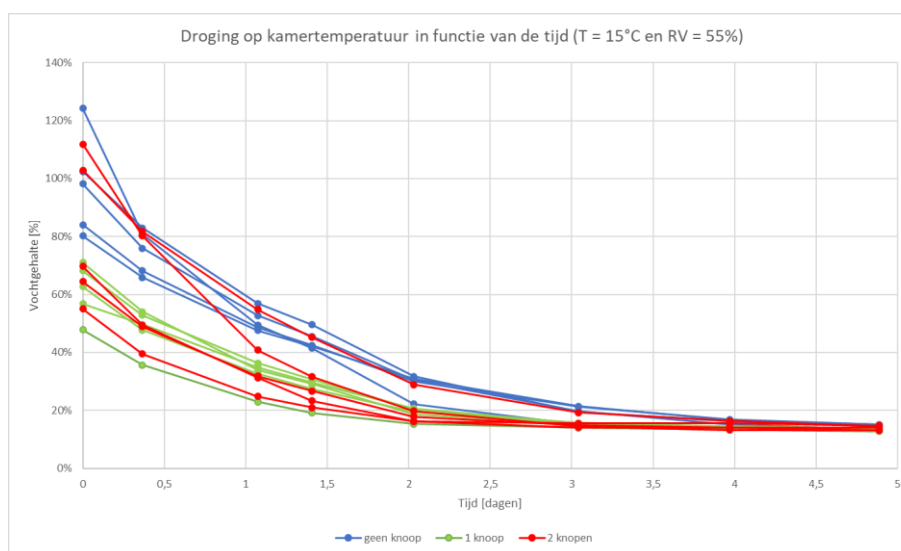
Op basis van een visuele inspectie kan waargenomen worden dat het buitenoppervlak van proefstukken uit stok Q een grotere reflectie vertoont ten opzichte van de stokken uit stok R. Door de stokken vast te nemen volgt dat de proefstukken uit stok Q beschikken over een glad oppervlak terwijl de proefstukken

uit stok R beschikken over enige ruwheid. Bijkomend is er in Figuur 39 zichtbaar dat er sponsachtige vezels aanwezig zijn in de proefstukken uit stok R terwijl deze niet aanwezig zijn bij de proefstukken uit stok Q. Het proefstuk uit stok S (niet opgenomen in Figuur 38 of Figuur 39) beschikt ook over sponsachtige vezels in de holte. De sponsachtige vezels zijn nog altijd aan- en afwezig bij de respectievelijke proefstukken indien ze middendoor worden gezaagd. Tot slot wordt er ter hoogte van de knopen geen verschil waargenomen tussen de verschillende proefstukken. De knopen beschikken allemaal niet over een holte en zijn voor de vijf proefstukken massief. Afgaand op de resultaten van de vochtabsorptie en de geometrische kenmerken kan er aangenomen worden dat de aanwezigheid van sponsachtige vezels een invloed heeft op de vochtabsorptie van de proefstukken.

Op basis van de resultaten kan er gesteld worden dat de toename in vochtgehalte variabiliteiten vertoont tussen de drie verschillende varianten die beschouwd zijn, maar ook bij de vijf afzonderlijke proefstukken binnen één variant. Theoretisch kunnen deze verschillen in verband gebracht worden met de opnamecapaciteit van de proefstukken. De opnamecapaciteit van vocht staat in relatie met de geometrische kenmerken. Zo zijn kleine proefstukken gevoeliger voor variaties in vochtgehalte doordat er bij grotere diameters waterstofbruggen gevormd worden tussen het element waterstof in water en de lignine-matrix in bamboe [8].

De uitwendige diameter van de proefstukken voor deze proef waren allemaal kleiner dan 11,5 mm. Bij deze kleine diameters kan er gesteld worden dat de toename in vochtgehalte een constant verloop heeft gedurende de eerste 24 uur na onderdompeling. Hierna gaat de dichtheid en doorlatendheid van de cellulosevezels in de stam de voornaamste factor zijn om de opnamecapaciteit te begroten.

Buiten de toename in vochtgehalte is ook de evolutie van droging zichtbaar in Figuur 34, 35 en 36. Uit de drie grafieken kan afgeleid worden dat het droogproces op kamertemperatuur (15°C en relatieve vochtigheid van 55%) aan een hoger tempo plaatsvindt dan de vochtabsorptie. Bijkomend valt het ook op dat de proefstukken met een hoog vochtgehalte, een snelle reductie in vochtgehalte vertonen tijdens de droging. Figuur 40 geeft een meer gedetailleerde weergave van de droging weer.



Figuur 40: Droging proefstukken op kamertemperatuur

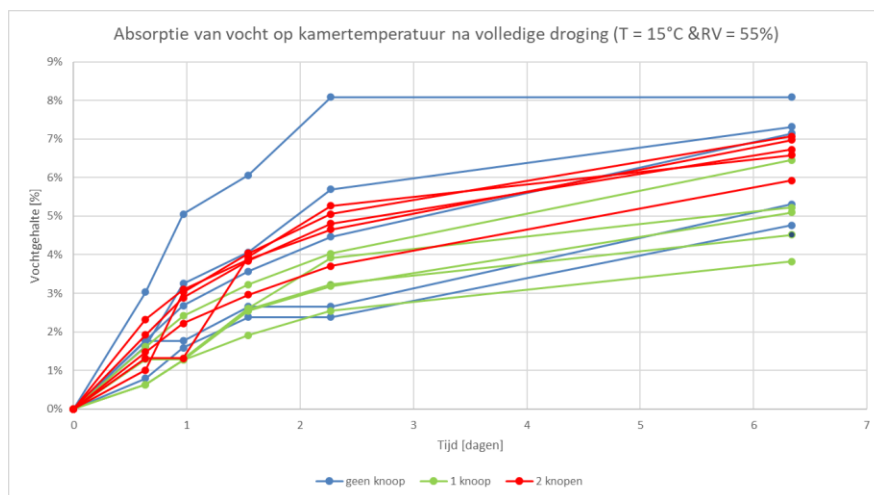
De droogfase in lucht vond plaats aan een gemiddelde temperatuur van 15°C en een relatieve vochtigheid van +/- 55%. Uit de resultaten volgt dat het vochtgehalte van de proefstukken gehalveerd is na een droogtijd van 26 uur en 45 minuten. Na reeds vier dagen drogen, is het vochtgehalte van de



proefstukken afgenomen tot gemiddeld 15%. Deze waarde is nagenoeg identiek aan het gemiddeld vochtgehalte van 13% bij aanvang van deze proef.

Na een droogfase in lucht van vijf dagen zijn de proefstukken verder gedroogd in een droogoven van 105°C. Bij de eerstvolgende meting, namelijk 9 uur en 45 minuten later, was het vochtgehalte van de proefstukken afgenomen tot 0% à 2%. Hieruit volgt dat het tijdsinterval van de metingen te groot is genomen om een evolutie van het droogproces te kunnen visualiseren. Afgaand op de snelheid waarmee de droging plaatsvindt bij bamboestokken van 8 tot 11 mm in diameter wordt er voor toekomstig onderzoek aangeraden om de droging te meten in tijdsintervallen van maximaal 30 minuten.

Nadat de proefstukken volledig gedroogd zijn in de oven, is opnieuw de toename in vochtgehalte gemonitord. Ditmaal zijn de proefstukken niet blootgesteld aan een relatieve vochtigheid van 100% in water, maar wel aan een relatieve vochtigheid van 55% op kamertemperatuur. Het resultaat van de verandering in vochtgehalte is zichtbaar in Figuur 41.



Figuur 41: Vochtabsorptie bij kamertemperatuur

In Figuur 41 wordt hetzelfde resultaat verkregen als in Figuur 33. Het vochtgehalte neemt sterk toe bij aanvang van de proef, waarna het vochtgehalte stabiliseert. Ook wordt er waargenomen dat de toename in vochtgehalte door absorptie uit de lucht veel minder snel verloopt dan bij volledige onderdompeling.

Vervolgens zijn alle bovenstaande beschrijvingen numeriek behandeld. Tabel 13 geeft de verandering in vochtgehalte per uur weer voor de verschillende proeven en proefstukken. De resultaten hiervan zijn vervolgens vereenvoudigd naar gemiddelden in Tabel 14 om een vergelijking mogelijk te maken.

Tabel 13: Verandering in vochtgehalte per uur

	Absorptie RV = 100%		Desorptie RV = 55%		Absorptie na volledige droging RV = 55%	
	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$
	24 uur	51 uur	24 uur	51 uur	24 uur	51 uur
Geen knoop	0,9%	0,9%	-1,8%	-1,4%	0,14%	0,11%
	0,8%	0,8%	-1,8%	-1,4%	0,11%	0,08%
	1,1%	0,8%	-2,9%	-2,0%	0,21%	0,15%
	1,3%	1,0%	-1,3%	-1,0%	0,07%	0,05%
	0,8%	1,0%	-1,4%	-1,1%	0,08%	0,05%
1 knoop	0,4%	0,3%	-1,0%	-0,6%	0,05%	0,05%
	0,5%	0,4%	-0,9%	-0,7%	0,06%	0,06%
	0,6%	0,5%	-1,2%	-0,9%	0,06%	0,06%
	0,5%	0,5%	-1,2%	-0,9%	0,06%	0,07%
	0,6%	0,6%	-1,4%	-1,0%	0,10%	0,08%
2 knopen	0,9%	0,8%	-2,8%	-1,8%	0,06%	0,10%
	0,6%	0,7%	-1,9%	-1,5%	0,12%	0,09%
	0,6%	0,5%	-1,5%	-1,1%	0,13%	0,10%
	0,5%	0,5%	-1,3%	-0,9%	0,09%	0,07%
	0,5%	0,5%	-1,2%	-0,8%	0,13%	0,09%

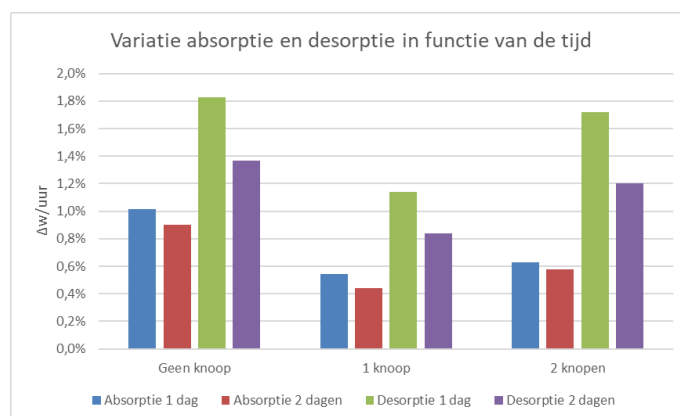
Tabel 14: Statistische analyse verandering in vochtgehalte

	Absorptie RV = 100%		Desorptie RV = 55%		Absorptie na volledige droging RV = 55%		
	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	$\Delta w/uur$	
	24 uur	51 uur	24 uur	51 uur	24 uur	51 uur	
Geen knoop	$\mu$	1,0%	0,9%	-1,8%	-1,4%	0,12%	0,09%
	$\sigma$	0,2%	0,1%	0,7%	0,4%	0,06%	0,04%
	CV	21%	11%	-36%	-30%	48%	48%
1 knoop	$\mu$	0,5%	0,4%	-1,1%	-0,8%	0,07%	0,06%
	$\sigma$	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,02%	0,01%
	CV	17%	21%	-21%	-19%	32%	18%
2 knopen	$\mu$	0,6%	0,6%	-1,7%	-1,2%	0,11%	0,09%
	$\sigma$	0,2%	0,1%	0,6%	0,4%	0,03%	0,01%
	CV	29%	26%	-37%	-36%	28%	13%

Uit Tabel 13 kan afgeleid worden dat de verandering in vochtgehalte per uur enige variabiliteit vertoont tussen de verschillende proefstukken. Deze vaststelling werd verwacht aangezien deze variabiliteit ook zichtbaar was in de grafieken. Bijkomend toont Tabel 13 ook dat de afname in absorptie minder drastisch verandert tussen 24 en 51 uur ten opzichte van desorptie. Dit fenomeen is geldig voor absorptie bij een RV van 100%, alsook bij een RV van 55%. Deze vaststelling wordt bevestigd aan de hand van de gemiddelde waarden in Tabel 14. Verder is er ook een groot verschil in snelheid van absorptie zichtbaar. Zo nemen de proefstukken bij een RV van 100%, 5 à 7 keer sneller vocht op ten opzichte van de proefstukken die blootgesteld worden aan een RV van 55%.

Opvallend bij de resultaten is dat desorptie twee keer sneller plaatsvindt ten opzichte van absorptie bij een RV 100% en zelfs 15 keer sneller ten opzichte van een RV van 55%. Ondanks deze hogere snelheid, is ook de onzekerheid en variatie in spreiding op het resultaat groter. Deze onzekerheid is echter geen probleem aangezien dit verwacht kon worden op basis van de resultaten in Figuur 34, 35 en 36. De snelheid van desorptie vertoont enige verschillen aangezien het maximaal bereikte vochtgehalte variabel was. Zo is het te verwachten dat proefstukken met een vochtgehalte van meer dan 100% na 28 dagen, snel meer vocht zullen verliezen ten opzichte van proefstukken met een vochtgehalte van slechts 60%.

Tot slot worden de resultaten uit Tabel 14 samengevat in figuur 42 om het verschil in snelheid visueel te vergelijken.



Figuur 42: Vergelijking adsorptie en desorptie per uur, per type van proefstukken

Algemeen kan de invloed van knopen op de vochtabsorptie verklaard worden op basis van twee redenen. Allereerst hebben de knopen een grotere dichtheid ten opzichte van de rest van de structuur waardoor de verandering in vochtgehalte bijgevolg minder significant is zoals volgt uit de resultaten van de proefstukken met één knoop (zie Figuur 33 en Tabel 14). Bijkomend verhinderen de knopen de infiltratie van water in de buis bij proefstukken met twee knopen op basis van hun massieve karakter. Dit heeft als gevolg dat vocht enkel kan infiltreren langs de buitenwand en niet via de binnenwand.

## 6.3 Trekproef

### 6.3.1 Treksterkte algemeen

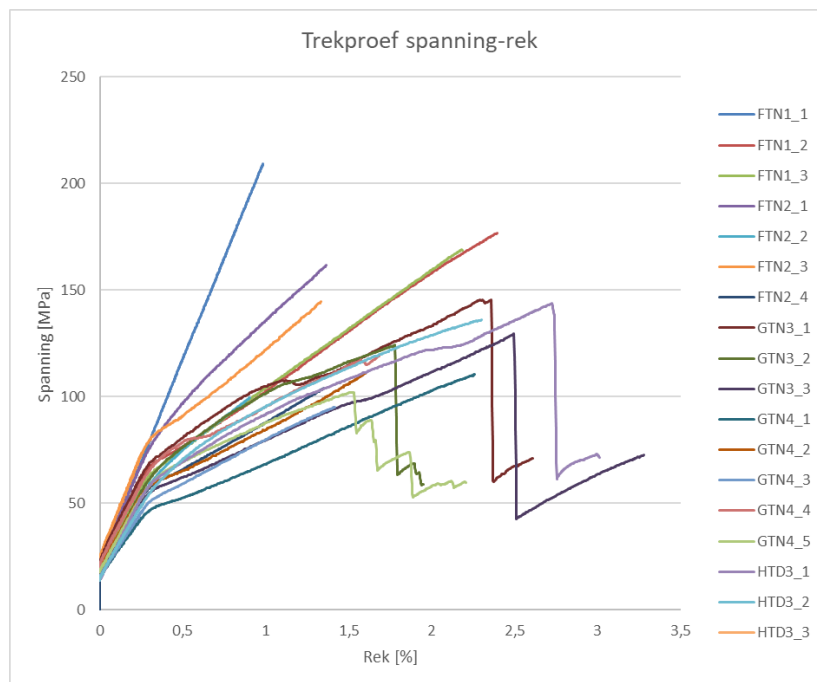
Vervolgens zijn er trektesten uitgevoerd op negentien verschillende bamboestrips. Deze strips zijn uit vier verschillende bamboestokken verkregen. Dit maakt het mogelijk om later de bekomen treksterktes te vergelijken met de densiteiten om zo een mogelijke correlatie te beschrijven.

De resultaten van de negentien trekproeven zijn terug te vinden in Tabel 15 en Figuur 43.

Tabel 15: Resultaten trekproeven

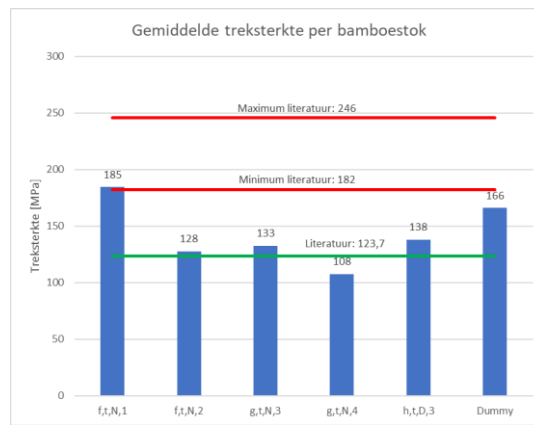
Identificatie	Nummer	Breedte [mm]	Diepte [mm]	Oppervlak [mm <sup>2</sup> ]	Kracht [N]	Treksterkte [MPa]	E-modulus [GPa]	Faailmodus
f,t,N,1	1	3,94	2,65	10,44	2180	209	19,4	Buitenoppervlak grip
	2	2,82	3,7	10,43	1840	176	17,3	Buitenoppervlak grip
	3	2,75	4,5	12,38	2090	169	15,7	Buitenoppervlak grip
f,t,N,2	1	3,87	2,49	9,64	1560	162	18,1	Binnenoppervlak grip
	2	4,72	2,66	12,56	1250	100	13,9	Binnenoppervlak grip
	3	3,37	2,38	8,02	1160	145	19,2	Binnenoppervlak grip
	4	5,01	2,79	13,98	1450	104	14,9	Buitenoppervlak grip
g,t,N,3	1	3,6	2,43	8,75	1270	145	15,3	Longitudinaal
	2	4,3	2,79	12	1490	124	14,8	Longitudinaal
	3	5,37	2,29	12,3	1590	129	13,9	Longitudinaal
g,t,N,4	1	4,85	2,49	12,08	1340	111	10,7	Buitenoppervlak grip
	2	4,11	2,14	8,8	979	111	13,5	Buitenoppervlak grip
	3	4,83	2,61	12,61	1200	95	11,9	Buitenoppervlak grip
	4	4,57	2,08	9,51	1130	119	14,7	Longitudinaal en buitenoppervlak grip
	5	4,75	2,32	11,02	1120	102	13,8	Buitenoppervlak grip
h,t,D,3	1	5,85	2,61	15,27	2200	144	15,5	Longitudinaal
	2	5,03	2,69	13,53	1840	136	13,3	Buitenoppervlak grip
	3	5,87	2,75	16,14	2160	134	14,8	Buitenoppervlak grip
Dummy	1	6,3	2,05	12,92	2140	166	18	Buitenoppervlak grip

<b>AVG</b>	136	15,2
------------	-----	------



Figuur 43: Resultaten trekproef

De gemiddelde treksterkte uit de negentien uitgevoerde proeven bedraagt 136 MPa. Dit stemt overeen met de gevonden literatuur (zie 4.1.1 Trekproef) waarin staat dat de gemiddelde treksterkte van Tonkin 84,7 MPa bedraagt ter hoogte van knopen en 123,7 MPa in het gedeelte zonder een knoop [16]. Ondanks dat de waarde in lijn ligt met [16], liggen de resultaten niet in lijn met [56]. Hierin wordt gesteld dat de gemiddelde treksterkte van Tonkin 203,4 MPa bedraagt waarbij het minimum en maximum respectievelijk 182 MPa en 246 MPa bedraagt. Figuur 44 geeft het gemiddeld resultaat per bamboestok weer in vergelijking met de resultaten uit [56] in de rode kleur en in vergelijking met de resultaten uit [16] in een groene kleur.



Figuur 44: Vergelijking gemiddelde treksterkte per stok met resultaten uit de literatuur

Uit Figuur 44 volgt dat de verkregen treksterkte aanzienlijk lager ligt dan de waarden uit de literatuur [56]. Enkel voor stok f,t,N,1 de onderste limiet gehaald voor de treksterkte. Bijkomend valt het ook op dat de resultaten tussen de verschillende stokken onderling enige variabiliteit vertonen.

Ook is zichtbaar dat er tussen de literatuur [16] en [56] een relatief grote variabiliteit waarneembaar is. De variabiliteit komt voort uit het feit dat bamboe een natuurlijk materiaal is met heterogene eigenschappen. Zo vallen de bekomen waarden uit de trekproef in lijn met [16], maar liggen ze onder de waarden bekomen in [56].

De grote variatie aan waarden voor kan verklaard worden op basis van problemen door de kleine dwarsdoorsneden van de bamboestrips. Door het splijtproces worden de proefstukken niet gespleten in rechthoekige vormen, maar in gebogen vormen. Deze werden manueel bijgewerkt met een afbreekmes totdat er een nagenoeg rechthoekige vorm werd bekomen. Hierdoor wordt de dwarsdoorsnede in beperkte mate overschat aangezien de holle zone in de geboden delen geen materiaal bevat. Bijkomend zorgt deze lichte kromming ervoor dat wanneer de strips ingeklemd worden, de bamboe zelf al scheuren vertoont voordat de kracht wordt aangebracht. Hierdoor zal de treksterkte van de bamboe een lagere waarde aannemen en vervolgens dus niet zijn maximale treksterkte bereiken.

De elasticiteitsmodulus van de proefstukken is bepaald met een extensometer. De gemiddelde elasticiteitsmodulus die naar voren komt uit de negentien proeven bedraagt 15,2 GPa. Deze waarde ligt lager dan gevonden wordt in de literatuur van Tonkin. Zo stelt [16] dat de elasticiteitsmodulus van Tonkin ( $17,6 \pm 1,4$ ) GPa bedraagt. Dit verschil kan verklaard worden op basis van de gebruikte diameters in de proeven. Zo is er in [16] gebruikgemaakt van stokken met een gemiddelde diameter van 25 mm terwijl deze slechts 9,9 mm bedroegen binnen deze masterproef. Ook hier kunnen afwijkingen in de resultaten weer in verband worden gebracht met de geometrische beperkingen.

Wanneer er wordt gekeken naar de faalmodus van de bamboestrip wordt geconstateerd dat het proefstuk voornamelijk faalt aan het raakvlak met de grips. Het falen kan zowel binnen de grip als er juist buiten plaatsvinden (zie Figuur 45). Enkele malen is de bamboestrip longitudinaal gefaald, dit is het ideale scheurpatroon (zie Figuur 46).



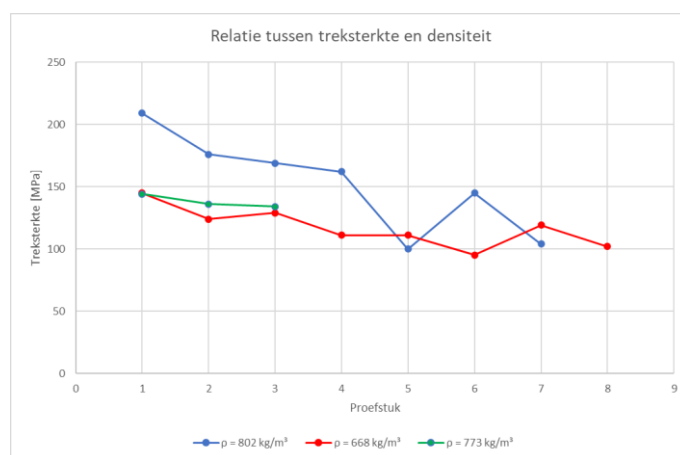
Figuur 45: Falen van bamboestrip aan inklemming grip



Figuur 46: Longitudinaal falen van de bamboestrip

Doordat enkele proefstukken gefaald zijn aan het raakvlak van de grips, zijn ze niet gefaald aan de ultieme treksterkte. Dit wil zeggen dat de proefstukken nog enige capaciteit bezitten om hogere treksterktes te weerstaan. Hierdoor worden de verkregen waarden voor de treksterkte beschouwd als ondergrens.

Verder kan ook de relatie tussen de treksterkte en dichtheid geanalyseerd worden. De trektesten zijn uitgevoerd met proefstukken uit drie verschillende stokken. Dit maakt dat er drie verschillende dichtheiten zijn. Dit wordt in Figuur 47 weergegeven.



Figuur 47: Relatie tussen treksterkte en dichtheid

In Figuur 47 geeft de blauwe, groene en rode lijn respectievelijk de dichtheid van proefstukken f, g en h weer zoals weergegeven in Tabel 15. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de telling in Figuur 47 per proefstuk doorloopt. Zo komt proefstuk 4 van de blauwe lijn (proefstuk f) overeen met f,t,n,2,1 in Tabel 15. Deze regelgeving geldt ook voor proefstuk g.

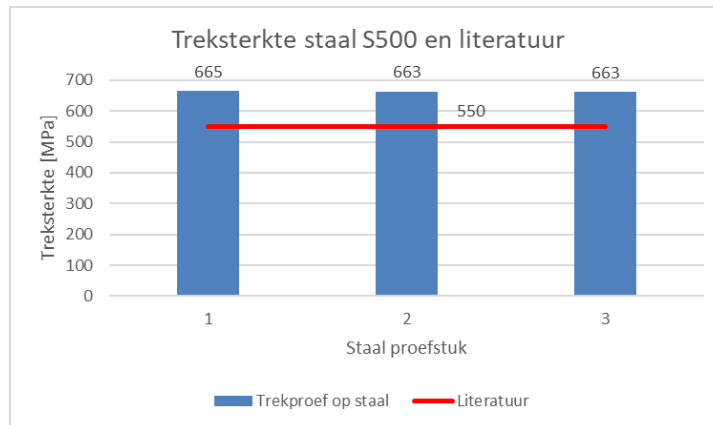
In Figuur 47 is geen exacte relatie zichtbaar die het verloop van de grafieken beschrijft. Echter is er wel een trend waarneembaar. Zo bezitten de proefstukken die komen uit een bamboestok met een hogere dichtheid een hogere treksterkte. Echter dient hierbij ook rekening gehouden te worden met de mogelijke meetfouten van zowel de treksterkte als de dichtheid wegens de onregelmatige vorm van de bamboestokken en de onzekerheid bij het afwegen van de proefstukken.

Niet enkel zijn er trekproeven uitgevoerd op bamboe. Ook zijn er drie trekproeven uitgevoerd op staalwapening met een diameter van 10 mm. Hierbij werd er gebruikgemaakt van staal S500. De

resultaten van de trekproeven op staal worden in Tabel 16 weergegeven en een vergelijking met de literatuur wordt weergegeven in Figuur 48.

Tabel 16: Treksterkte en Young's modulus van staal S500

Identificatie	Nummer	Treksterkte [MPa]	Young's modulus [GPa]
Staal	1	665	174
	2	663	208
	3	663	138
	AVG	664	173

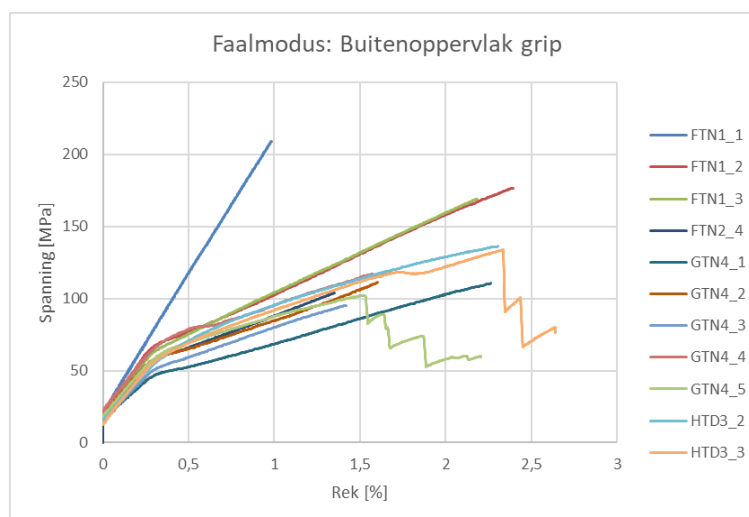


Figuur 48: Vergelijking trekproef op staal en literatuur

De gemiddelde treksterkte van het staal bedraagt 663,67 MPa met een Young's modulus van 173 GPa (zie Tabel 16). Dit komt overeen met waarden uit de gevonden literatuur die beschrijven dat de treksterkte van staal S500 minstens 550 MPa bedraagt [57] (zie Figuur 48). De treksterkte van het staal ligt 4,5 à 5 keer hoger dan de proefstukken uit Tonkin en de Young's modulus 11 à 11,5 keer. Ook bij de trekproef op staal is er de extensometer gebruikt voor de bepaling van de Young's modulus, net zoals bij de bepaling van de Young's modulus van de proefstukken uit Tonkin.

### 6.3.2 Treksterkte per faalmodus

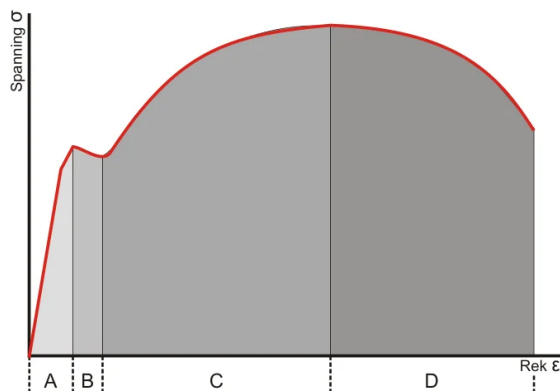
Ook wordt de trekproef geanalyseerd per faalmodus. Figuren 49, 51 en 52 geven de grafieken weer volgens respectievelijk de faalmodussen: buitenoppervlak grip, binnenoppervlak grip en longitudinaal.



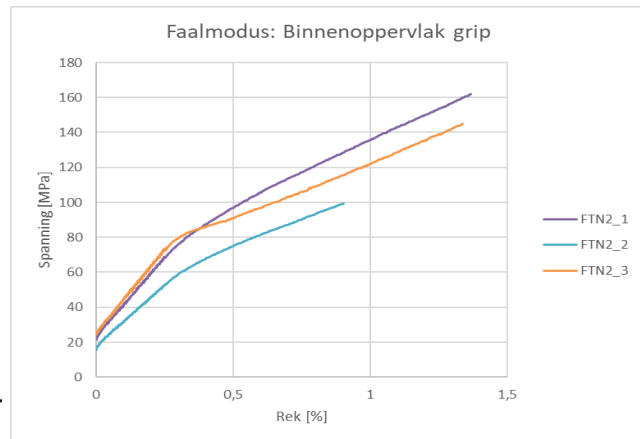
Figuur 49: Treksterkte bij faalmodus buitenoppervlak grip

Uit Figuur 49 kan geconcludeerd worden dat, op uitzondering van proefstuk FTN1\_1, dat de spanning van de proefstukken lineair toeneemt tot een rek van  $\pm 0,3\%$  rek waarna het een knik maakt. Vanaf de knik neemt de sterkte nog altijd lineair toe, maar aan een mindere snelheid. Er is met andere woorden vanaf het knikpunt minder kracht nodig om een rek te verkrijgen als dat nodig was voor de knik.

Ook is in Figuur 49 zichtbaar dat de proefstukken een bros breukgedrag vertonen. Er is geen vloeigrens of een verlaging van de spanning bij een oplopende rek. Staal daarentegen is een ductiel materiaal. Staal heeft wel een vloeigrens en een overgangsfase waarbij de spanning afneemt bij een toenemende rek. Een spanning-rekdiagram bij een trekproef op staal wordt weergegeven in Figuur 50, waarbij in gebied D, insnoering van het materiaal wordt optreedt.



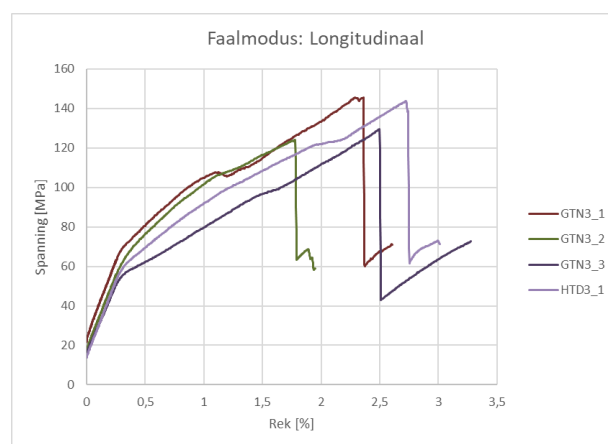
Figuur 50: Spanning – rek diagram staal [58]



Figuur 51: Treksterkte bij faalmodus binnenoppervlak grip

Wanneer de proefstukken faalden ter hoogte van de binnenkant van het gripoppervlak vertonen ze hetzelfde gedrag als in de situatie wanneer de proefstukken faalden aan de buitenkant van het gripoppervlak. Enkel de plaats van het falen van de proefstukken verschilt met enkele centimeters. Hierdoor vertoont Figuur 51 hetzelfde gedrag als Figuur 49. Ook hierbij treedt er een knik op in de grafiek ter hoogte van  $0,3\%$  rek.

Ook wanneer een proefstuk faalt aan het binnenoppervlak van de grips is te zien dat Tonkin een bros materiaal is.



Figuur 52: Treksterkte bij faalmodus longitudinaal

In Figuur 52 is de treksterkte van de proefstukken te zien die falen onder longitudinale slijping. Ook bij deze faalmodus is er een knik in de treksterkte waarneembaar vanaf  $0,3\%$  rek. Daar waar in de grafiek een daling plaatsvindt, faalt het proefstuk door slijping in de longitudinale richting. Echter faalt het

proefstuk nog niet volledig bij dit punt aangezien ze niet volledig gebroken is. Nadat de splijting van de bamboestok optreedt, behaalt het nog een lagere treksterkte waar het nog weerstand biedt.

## 6.4 Uittrekproef

Voorafgaand aan de uitvoering van de uittrekproef moest het beton drogen gedurende 28 dagen. Tijdens de droging zijn reeds drukproeven uitgevoerd om de theoretische sterkte van het beton te kunnen vergelijken met het praktische resultaat.

### 6.4.1 Drukproeven beton

De druksterkte van de betonnen kubussen werd gemeten op drie verschillende momenten, namelijk na acht dagen, 28 dagen en na 32 dagen bij de uitvoering van de uittrekproeven. Wegens logistieke redenen (Paasmaandag) kon de druksterkte niet na zeven dagen gemeten worden zoals wordt aangeraden in de norm NBN EN 12390-3. Hierdoor is een dag opgeschoven waardoor de eerste meting na acht dagen plaatsvond. Hetzelfde probleem vond plaats bij de meting na 28 dagen. Deze dag viel op een feestdag (Dag van de Arbeid) waardoor ook deze test uitgesteld werd met één dag.

Wegens een tekort aan kubusmallen zijn er acht kubussen voorzien in plaats van negen. Zo zijn er na acht dagen drie kubussen beproefd, na 29 dagen ook drie kubussen en tenslotte bij de uitvoering van de trekproeven slechts twee kubussen.

De resultaten van de drukproeven worden in Tabel 17 weergegeven.

Tabel 17: Resultaten drukproeven

Beproeving	Identificatie	Druksterkte [Mpa]
Na 8 dagen	Kubus 1	50,29
	Kubus 2	49,68
	Kubus 3	52,20
Na 29 dagen	Kubus 4	57,77
	Kubus 5	65,56
	Kubus 6	63,96
Na 32 dagen	Kubus 7	58,27
	Kubus 8	58,26

In Tabel 17 is zichtbaar dat de druksterkte van het beton toeneemt naarmate de tijd vordert. Zo bedraagt de gemiddelde druksterkte na acht dagen 50,7 MPa, na 29 dagen 62,4 MPa en bij uitvoering van de uittrekproeven na 32 dagen 58,3 MPa.

De resultaten van de drukproeven worden vergeleken met de sterkte die verwacht wordt in functie van de tijd aan de hand van formule 3.1 uit NBN EN 1992-1-1:2005 [59].

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm} \quad (12)$$

Waarbij:

- $f_{cm}$  = gemiddelde druksterkte op 28 dagen [N/mm<sup>2</sup>]
- $\beta_{cc}(t)$  = coëfficiënt die afhangt van de ouderdom t van het beton

Hierbij wordt  $\beta_{cc}(t)$  berekend volgens formule 3.2 uit NBN EN 1992-1-1:2005 [59].



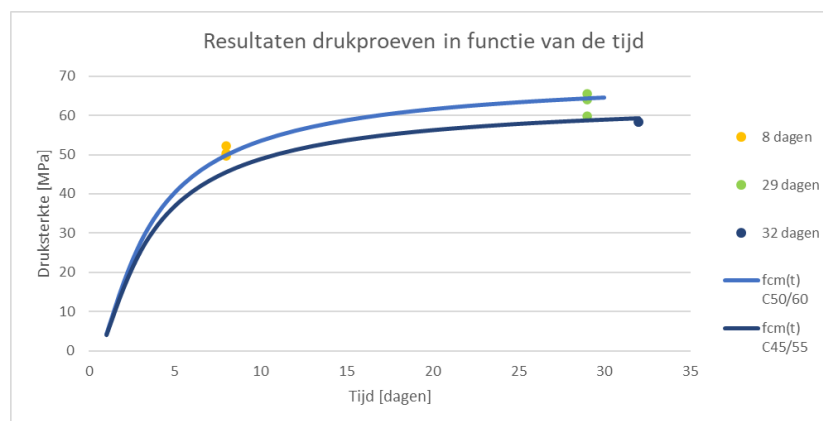
$$\beta_{cc}(t) = \exp\left(s * \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right) \quad (13)$$

Waarbij:

- $t$  = ouderdom van het beton [dagen]
- $s$  = coëfficiënt die afhangt van de soort cement

De waarde voor parameter  $s$  is afhankelijk van het gebruikte cementtype. Voor cem I 52,5 N bedraagt dit 0,20.

De waarde voor  $f_{cm}$  wordt gekozen zodanig dat de verkregen rechte de meetresultaten zo nauwkeurig mogelijk benaderd. Wanneer bovenstaande formules ingevuld worden in functie van de tijd en gecombineerd worden met de resultaten van de drukproeven, wordt Figuur 53 bekomen.



Figuur 53: Vergelijking resultaten druksterkte met de verwachte sterkte

Uit Figuur 53 volgt dat de resultaten van de druksterkte niet aansluiten bij 1 curve met de verwachte druksterkte. Zo sluit het rekenkundig gemiddelde van de resultaten na 8 dagen en 29 dagen aan bij een sterkteklasse C50/60. Het rekenkundig gemiddelde na 32 dagen sluit echter niet aan bij een C50/60 maar eerder bij een C45/55. Dit resultaat is onverwacht aangezien de sterkte na 32 dagen groter dan of gelijk aan de sterkte van 28 dagen hoort te zijn.

Ondanks dat de resultaten niet volledig aansluiten bij één curve is de proef succesvol verlopen. In Tabel 17 is het zichtbaar dat de sterkte van kubus 4 aanzienlijk lager is ten opzichte van kubus 5 en 6. Wanneer het resultaat van deze 2 kubussen buiten beschouwing wordt gelaten, sluit het resultaat na 28 dagen exact aan bij de sterkteklasse C45/55.

Hoewel het resultaat van kubus 1, 2 en 3 hoger ligt dan de verwachte waarde bij een C45/55, is een hoger gelegen resultaat niet foutief. Portlandcementen (CEM I) staan bekend om op korte termijn uit te harden. Deze korte uithardingsfase gaat bijgevolg gepaard met een snelle sterkteontwikkeling.

Het resultaat voor de betondruksterkte sluit goed aan bij de vooraf berekende sterkte van een C45/55 (zie 5.2 Samenstelling betonmengsel)

De verkregen sterkteklasse C45/55 is hoger dan de C25/30 of C30/37 die veelvuldig wordt voorgeschreven voor structurele elementen in België. Er kan aangenomen worden dat de technische kennis over bouwmaterialen in België groter is dan in ontwikkelingslanden. Door het gebrek aan kennis zal ook de betonkwaliteit mogelijk lager liggen. In dit onderzoek is de hechtsterkte van Tonkin bepaald voor deze sterkteklasse. Wanneer een lagere sterkteklasse gebruikt wordt, bestaat de mogelijkheid dat

er een lagere hechtsterkte wordt bereikt. Deze stelling is louter hypothetisch. Verder onderzoek moet uitwijzen of deze stelling effectief klopt.

#### 6.4.2 Globale bespreking uittreksterkte

Bij het uitvoeren van de uittrekproef wordt de kracht gemeten door de trekbank die nodig is om de proefstukken uit het beton te trekken. Bij het bereiken van deze kracht wordt de statische binding tussen de proefstukken en het beton verbroken waardoor er geen adhesie meer aanwezig is. Op basis van de verkregen uittrekkraft kan de hechtsterkte berekend worden aan de hand van Formule 14.

$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot L_b} \quad (14)$$

Waarbij:

- F = maximaal gemeten trekkracht [N]
- d = gemiddelde diameter proefstuk [mm]
- $L_b$  = inbeddingslengte [mm]

De resultaten van de 23 uittrekproeven zijn terug te vinden in Tabel 18.

Tabel 18: Resultaten uittrekproef

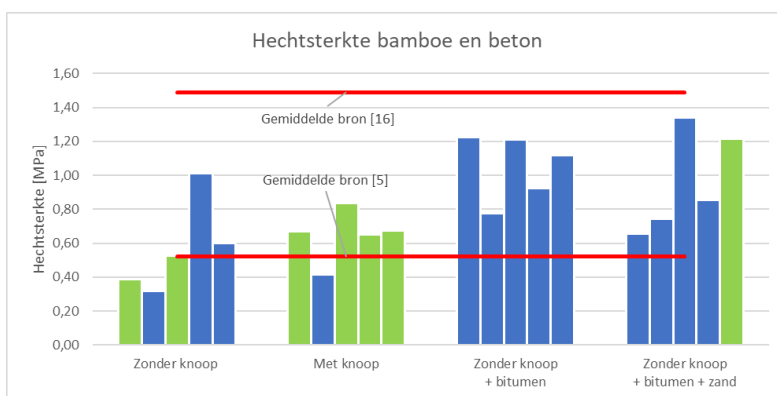
Proef	Deelproef	Identificatie	Gemiddelde diameter uitwendig [mm]	Inbeddingslengte [cm]	Trekkracht [kN]	Hechtsterkte [N/mm <sup>2</sup> ]	Opmerkingen
Uittrekproef	Zonder knoop in beton	j,u,Z,G,1	8,65	12,3	1,30	0,39	/
		j,u,Z,G,2	9,68	14,4	1,40	0,32	Faal eindverankering
		j,u,Z,G,3	9,23	14,6	2,23	0,53	/
		k,u,Z,G,4	9,85	14,5	4,54	1,01	Faal eindverankering
		k,u,Z,G,5	10,30	14,2	2,76	0,60	Faal eindverankering
	Met knoop in beton	o,u,K,G,1	10,35	13,9	3,03	0,67	/
		o,u,K,G,2	9,23	14,5	1,75	0,42	Faal eindverankering
		p,u,K,G,3	9,58	13,9	3,49	0,83	/
		p,u,K,G,4	9,23	14,9	2,82	0,65	/
		p,u,K,G,5	8,90	13,7	2,59	0,68	Proefstuk breekt thv de knoop in het beton
	Zonder knoop in beton + Bitumen	k,u,B,1	9,40	14,3	5,17	1,22	Faal eindverankering
		l,u,B,2	9,45	14,5	3,35	0,78	Faal eindverankering
		l,u,B,3	9,10	14,2	4,91	1,21	Faal eindverankering
		l,u,B,4	8,53	14,7	3,64	0,92	Faal eindverankering
		m,u,B,5	8,38	14,4	4,24	1,12	Faal eindverankering
	Zonder knoop in beton Bitumen + zand	m,u,BZ,1	8,90	14,3	2,62	0,66	Faal eindverankering
		m,u,BZ,2	9,38	14,7	3,22	0,74	Faal eindverankering
		n,u,BZ,3	9,28	14,2	5,55	1,34	Faal eindverankering
		n,u,BZ,4	8,30	14,6	3,26	0,86	Faal eindverankering
		n,u,BZ,5	8,93	14,7	5,01	1,22	Faal eindverankering
	Staal	1	10	14,2	51,6	11,57	Uitrekking staal met 9 mm
		2	10	14,6	42,3	9,22	Uitrekking staal met 28 mm
		3	10	14,2	47,4	10,63	Uitrekking staal met 16 mm

Ten eerste wordt uit Tabel 18 afgeleid dat de inbeddingslengte enige variabiliteit vertoont tussen 12,3 cm en 14,7 cm. De reden voor deze variatie komt door het verschil in densiteit tussen beton en bamboe. De gemiddelde densiteit van de bamboestokken bedraagt 745,5 kg/m<sup>3</sup> terwijl de gemiddelde densiteit van het beton 2332 kg/m<sup>3</sup> bedraagt. Door dit verschil is de natuurlijke reactie van de bamboestokken om op te drijven. Dit fenomeen wordt bijkomend verstrekt bij het aanrillen van het beton. Op basis van de trilenergie die wordt toegevoegd zijn de korrels in staat om langs elkaar te kunnen bewegen om op deze manier de holten en ingesloten luchtdeeltjes te verdrijven. Hierdoor wordt het mengsel zo compact mogelijk verdicht. Op basis van deze trilenergie neemt de snelheid van de opdrijving aanzienlijk toe.

Ten tweede valt het op dat de maximale hechtsterkte slechts bij zeven proefstukken is bereikt. Door herhaaldelijke uitstel van de trialproeven was het niet mogelijk om een geschikte eindverankering te

ontwerpen waarbij de eindzones van de bamboestokken gevrijwaard blijven van schade tijdens de inklemming. Bij het uitvoeren van de uittrekproef volgde dat de eindverankering onvoldoende sterke bood bij de meeste proefstukken uit het beton te trekken. Zo trad er slip op ter hoogte van de aangebrachte eindverankering. Ondanks dit probleem is er geprobeerd om de proefstukken uit het beton te trekken door gebruik te maken van platte grips. Het probleem dat hier plaatsvond was dat de bamboe volledig verbrijzeld werd in de grips voordat er slip optrad in het beton.

Vervolgens worden de proefstukken vergeleken met testresultaten die gevonden worden in de literatuur. Figuur 54 geeft hier het resultaat van weer.



Figuur 54: Vergelijking resultaten uittrekproef met resultaten uit de literatuur

In Figuur 54 zijn in het groen de resultaten zichtbaar van de proeven die succesvol uitgevoerd zijn. Wanneer de resultaten worden vergeleken met de literatuur valt het op dat de waarden hier een grote variabiliteit vertonen. Zo wordt in [5] een gemiddelde hechtsterkte verkregen van 0,52 MPa terwijl [16] stelt dat de hechtsterkte zonder en met een knoop respectievelijk 1,49 MPa en 2,16 MPa bedraagt. Specifiek voor dit onderzoek bedraagt de hechtsterkte 0,57 MPa bij proefstukken zonder adhesieverbetering terwijl de proefstukken met adhesieverbetering een gemiddelde hechtsterkte van 1,01 MPa bereiken. Deze resultaten zijn echter geen reële gemiddelden, maar een ondergrens voor de sterkte aangezien een breuk ter hoogte van de eindverankering eerder optrad dan slip in het beton.

Specifiek voor de proefstukken met een knoop wordt er een gemiddelde hechtsterkte van 0,65 MPa bereikt. De aanwezigheid van een knoop zorgt voor toename in sterkte van 14% ten opzichte van de proefstukken zonder knoop. De toename in hechtsterkte dankzij de knoop is voordeel aangezien deze altijd aanwezig is in de bamboestokken. Buiten de toename in sterkte biedt de knoop nog secundaire voordelen bij implementatie in beton. Zo zal de knoop na het bereiken van de maximale hechtsterkte zorgen voor een wig. Dit heeft als gevolg dat uittreksterkte van bamboe nog kan toenemen, zelfs na het bereiken van de maximale hechtsterkte.

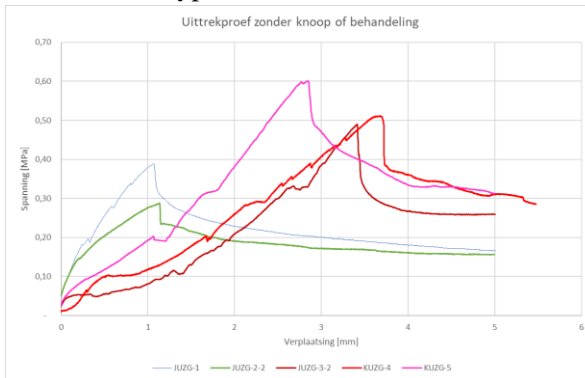
Bij de proeven met adhesieverbetering (bitumen en bitumen + zand) valt het op dat de eindverankering steeds faalt voorafgaand op slip in beton. Ondanks de mislukte proeven wordt er toch een gemiddelde hechtsterkte van 1,05 MPa voor de proefstukken met bitumen en 0,96 MPa voor de proefstukken met bitumen en zand verkregen. Op basis van deze resultaten kan niet bevestigd worden of de invloed van zand een positief of negatief effect heeft op de adhesie. Wel kan er bevestigd worden dat bitumen als adhesieverbetering betere resultaten biedt dan bij situaties zonder adhesieverbetering. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van Tabel 19.

Tabel 19: Verhouding hechtsterkte ten opzichte van de hechtsterkte zonder knoop of verbetering

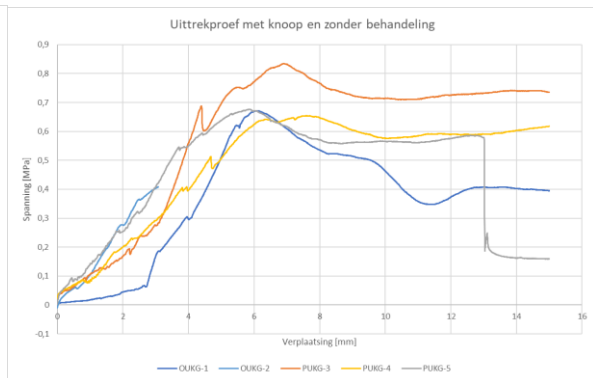
	Zonder knoop in beton Geen behandeling	Met knoop in beton Geen behandeling	Zonder knoop in beton Bitumen	Zonder knoop in beton Bitumen + zand
<b>Gemiddelde</b>	0,57	0,65	1,05	0,96
<b>Verhouding ten opzichte van geen knoop en geen behandeling</b>	1	1,1	1,8	1,7

### 6.4.3 Gedetailleerde bespreking uittreksterkte

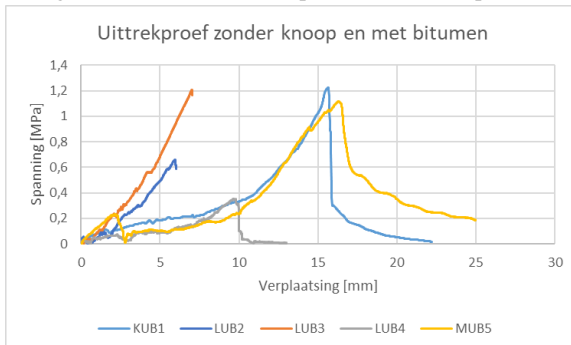
Figuren 55 tot en met 59 geven de spannings-verplaatsingsdiagrammen weer voor de 5 uitgevoerde verschillende types van uittrektesten.



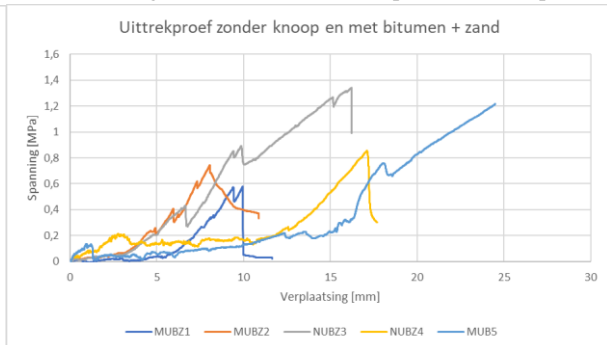
Figuur 55: Resultaat uittrekproef zonder knoop



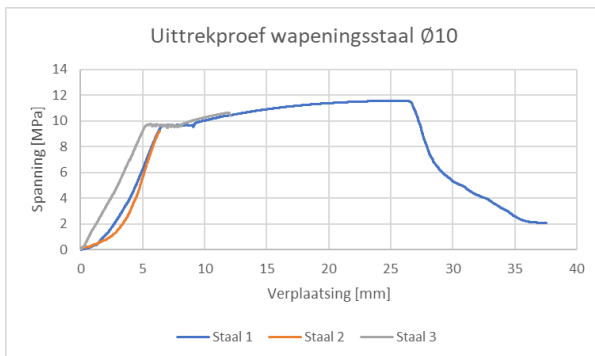
Figuur 56: Resultaat uittrekproef met knoop



Figuur 57: Resultaat uittrekproef zonder knoop en met bitumen



Figuur 58: Resultaat uittrekproef zonder knoop en met bitumen en zand



Figuur 59: Resultaat uittrekproef met wapeningsstaal Ø10

Uit Figuur 55 kan afgeleid worden dat een bepaalde spanning opgebouwd moet worden vooraleer de statische binding tussen bamboe en beton verbroken wordt. Vanaf het moment dat de statische binding verbroken wordt, stabiliseert de benodigde spanning om het vervolg van de proefstukken uit het beton te trekken. Dit gedrag is evenzeer zichtbaar in figuur 56.

Opvallend voor de proefstukken zonder en met knoop (Figuur 55 en 56) is het verschil in stijfheid. De stijfheid voor de proefstukken met knoop is bijna evenwaardig, terwijl deze voor de proefstukken zonder knoop behoorlijk variabel is. Een mogelijke verklaring voor het verschil in stijfheid kan gerelateerd worden aan de aanwezigheid van de knoop. Een knoop is macroscopisch zichtbaar als een verdikking in de stam. Door deze verdikking verankert het proefstuk zich in het beton waardoor het gedrag beter voorspeld kan worden. Bij de proefstukken zonder knoop is er enkel wrijving aanwezig tussen beide materialen waardoor het gedrag eerder variabel is. Zo kan een minimale rotatie of torsie ervoor zorgen dat de binding wordt verbroken. Door de aanwezigheid van een knoop, en dus een verankering, zal rotatie of torsie slechts een minimale invloed hebben.

Bij proefstuk PUKG-5 treedt een grote daling in spanning op na een verplaatsing van 13 mm (Figuur 56). Deze plotse daling wordt verklaard aan de hand van een opgetreden breuk. Het proefstuk brak ter hoogte van de knoop af terwijl de onderzijde nog verankerd zat in het beton.

Specifiek voor proefstuk PUKG-4 is er een apart gedrag zichtbaar na het bereiken van een verticale verplaatsing van 18 mm ten opzichte van de andere proefstukken. Vanaf dit moment treden er grote schommelingen op tussen de verplaatsing en benodigde spanning om de dynamische wrijving te overwinnen. Dit probleem komt tot stand doordat het proefstuk een relatief grote slip ondergaat in vergelijking met de snelheid van 10 mm/min waarmee de trekbank aan het proefstuk trekt. Dit schommelende resultaat is echter niet gewenst voor de karakterisatie van het gedrag. Hierdoor is dit fenomeen voor de andere proefstukken vermeden door de meting enkele seconden na het bereiken van de maximale waarde te beëindigen. Aansluitend op de beëindigde meting wordt een tweede meting gestart aan een hogere snelheid. Door de tweede meting uit te voeren aan 50 mm/min worden er geen schommelende waarden meer waargenomen.

Figuur 57 en Figuur 58 tonen de resultaten van respectievelijk de uittrekproef met bitumen en de uittrekproef met bitumen + zand. Tijdens het uitvoeren van de proeven was het noodzakelijk om de proefstukken aan een constante snelheid sterker en sterker in te klemmen om slip te vermijden. Dit had als gevolg dat de resultaten een grillige vorm vertonen. Hierdoor is het niet mogelijk om conclusies te trekken uit deze grafieken.

#### 6.4.4 Bespreking uittreksterkte staalwapening

Tot slot zijn er drie uittrekproeven uitgevoerd op staalwapening met  $\varnothing 10$  zoals zichtbaar in Figuur 59. Op basis van die grafieken is zichtbaar dat het gedrag bij de proefstukken met staal verschillend is ten opzichte van bij de proefstukken met bamboe. Zo sluit de evolutie van de trekproeven op staal beter aan bij het verloop van een trekproef. Bij de uitvoering van de trekproef volgde dat de keuze voor een verankeringslengte van 15 cm te veel was. Door dit probleem werd de vloeisterkte van staal overschreden. Dit had als gevolg dat de staven geen slip vertoonden met het beton, maar dat ze uitgetrokken werden door de verankering. Ondanks dat de staven een uitrekking ondergingen, trad er na verloop van tijd wel slip op. Figuur 60 toont de vervorming van staaf 1, 2 en 3. De uitrekking bedroeg respectievelijk 0,9 ; 2,8 en 1,6 mm.



Figuur 60: Uitgerokken staven tijdens uittrekproef

Afgaand op de resultaten wordt er een gemiddelde hechtsterkte van 10,47 MPa bereikt. De bekomen waarde is aanzienlijk groter dan wordt gerapporteerd in de literatuur. Gebaseerd op [18] zou de hechtsterkte van geribde staalwapening gelegen zijn rond 6,15 MPa. Echter is dit resultaat bekomen bij een betonsterkte C25/30 terwijl er in dit onderzoek gebruikgemaakt is van een betonsterkte C45/55. Aangezien de gebruikte betonsterkte aanzienlijk sterker is dan in de literatuur, is het aannemelijk dat de hechtsterkte bijgevolg ook groter is.

Vervolgens wordt in Tabel 20 de verhouding in hechtsterkte weergegeven waarbij de proefstukken zonder knoop of behandeling als referentie worden genomen.

Tabel 20: Verhouding hechtsterkte ten opzichte van de hechtsterkte zonder knoop of behandeling

	Zonder knoop in beton Geen behandeling	Met knoop in beton Geen behandeling	Zonder knoop in beton Bitumen	Zonder knoop in beton Bitumen + zand	Staal
<b>Gemiddelde</b>	0,57	0,65	1,05	0,96	10,5
<b>Verhouding ten opzichte van staal</b>	1	1,14	1,8	1,7	18,4

Opvallend voor Tabel 20 is de verhouding in hechtsterkte ten opzichte van de proefstukken met bamboe. Zo zorgt het resultaat na adhesieverbetering voor een verhouding van slechts 1,8 terwijl staal zorgt voor een verhouding van 18,4. Dit verschil wordt verklaard op basis van de aanwezigheid van ribbels in staalwapening, dewelke niet aanwezig zijn bij bamboe. Dankzij deze ribbels klemmen de aggregaten van het beton zich vast tussen deze ribbels van de wapening waardoor de hechting significant beter is. Bamboe beschikt enkel over knopen op onregelmatige afstand waardoor deze inklemming tussen de aggregaten slechts in beperkte mate kan plaatsvinden.

Ondanks dat er een verhouding van 18,4 wordt berekend verschilt dit in enige mate met de literatuur. Zo stelt [18] dat de verhouding in hechtsterkte tussen staalwapening en onbehandelde bamboe 4,2 bedraagt terwijl [5] stelt dat de verhouding 6,25 bedraagt.

#### 6.4.5 Vochtabsorptie door implementatie in beton

Ondanks de opgetreden problematiek zijn vijf onbehandelde proefstukken succesvol uit het beton getrokken. Bij deze proefstukken viel het direct op dat het ingebedde gedeelte van de proefstukken een grote vochtigheid vertoonde. Buiten de grote vochtigheid zijn er ook tekenen van aantasting aanwezig. Dit wordt weergegeven in Figuur 61 en 62.



Figuur 61: Aantasting proefstukken na implementatie in beton 1



Figuur 62: Aantasting proefstukken na implementatie in beton 2

Opvallend voor beide proefstukken in Figuur 61 en 62 is het verschil in zichtbaar vochtgehalte tussen het gedeelte boven en onder de knoop. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het vocht dat zich boven de knoop bevindt, in contact staat met de omgevingstemperatuur. Hierdoor kan het vocht vanuit de stam verdampen. Het vocht dat zich onder de knoop bevindt zit als het ware opgesloten door enerzijds het beton en anderzijds de knoop. Het vocht ondervindt een grote weerstand tijdens de migratie door de knoop omwille van de grotere dichtheid. Het verschil in dichtheid en de grote aanwezigheid van cellulosevezels wordt weergegeven in figuur 63.



Figuur 63: Verschil in opbouw tussen bamboestok en knoop

Afgaand op de toestand van de proefstukken na 32 dagen kan er geconcludeerd worden dat het noodzakelijk is om maatregelen te nemen tegen vochtabsorptie. Op basis van dit fenomeen zijn de proefstukken vlak na de uitvoering van de testen gewogen en nadien in een droogoven op 105°C gestoken. Tabel 21 geeft het resultaat van het vochtgehalte na droging weer. Bijkomend worden de resultaten in Tabel 22 ook vergeleken met de waarden die reeds besproken zijn in Tabel 12.

Tabel 21: Resultaten droging proefstukken uittrekproef

Proefstuk	Vochtgehalte Dag 0	Vochtgehalte Dag 29
JUZG1	13%	25%
JUZG3	13%	21%
OUCG1	13%	17%
PUKG3	13%	18%
PUKG4	13%	19%

Tabel 22: Vergelijking statistische analyse vochtgehalte bij onderdompeling en in beton

	Vochtgehalte Dag 0	Absorptie na 28 dagen (29 dagen voor beton)			
		Geen knoop	1 knoop	2 knopen	Beton
$\mu$	13%	98%	61%	81%	20%
$\sigma$	0,9%	17%	9,3%	25%	3,2%
CV	7%	18%	15%	31%	16%

De resultaten in Tabel 21 geven het vochtgehalte weer van de proefstukken na een inbedding van 32 dagen in beton. Specifiek voor deze proef is het initieel vochtgehalte van de proefstukken niet bepaald. Er is aangenomen dat het vochtgehalte van deze proefstukken hetzelfde is als de proefstukken van de vochtabsorptie omwille van dezelfde randvoorwaarden bij aanvang van de proeven. In Tabel 21 en 22 is zichtbaar dat het gemiddeld vochtgehalte van de proefstukken in beton is toegenomen van 13% naar 20%.

Wanneer de resultaten vergeleken worden met de ondergedompelde proefstukken, is het zichtbaar dat het vochtgehalte in beton minder hoge waarden bereikt. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat het betonmengsel zelf water nodig heeft om het cement te kunnen hydrateren. Omdat het mengsel zelf water nodig heeft, is er minder water beschikbaar om opgeslagen te worden in de bamboestok. Bijkomend zorgt het exotherme hydratatieproces van cement ervoor dat er hydratatiewarmte vrijkomt. Van alle cementsoorten die uitharden aan een normale snelheid, beschikt CEM 52,5 N over de grootste hydratatiewarmte. Zo kan er als richtwaarde aangenomen worden dat elke gram cement 315 J aan warmte produceert [60].

Ondanks dat de proefstukken in beton veel minder vocht absorberen ten opzichte van in een waterbak, moet er expliciet rekening gehouden worden met afnemende mechanische eigenschappen door de toename in vochtgehalte. Op basis van de resultaten uit [61] kan aangenomen worden dat de treksterkte van bamboe met 13,6% afneemt bij een verandering in vochtgehalte van 14,89% naar 25,89%. Aangezien de verandering in vochtgehalte voor deze proef toeneemt van 13% naar 20%, zal er op basis van de resultaten [61] bijgevolg een reductie in treksterkte afnemen.

Tot slot kan er ook waargenomen worden dat de standaarddeviatie bij de proefstukken in beton (3%) aanzienlijk kleiner is ten opzichte van de ondergedompelde proefstukken. Echter mag het verschil in standaardafwijking niet zomaar vergeleken worden tussen de verschillende types van proeven. Doordat het gemiddeld vochtgehalte van de proefstukken in beton aanzienlijk lager is dan het vochtgehalte bij de ondergedompelde proefstukken, is het ook logisch dat de afwijking op de resultaten bijgevolg minder zal variëren. Door gebruik te maken van de variatiecoëfficiënten volgt er dat de spreiding op de proefstukken in beton dezelfde grootteorde (16%) aanneemt als de proefstukken zonder knoop (15%) en de proefstukken met 1 knoop (15%).

#### 6.4.6 Algemene problematiek:

Op basis van de tegengekomen problemen kan er gesteld worden dat er fundamentele fouten gemaakt zijn in de voorbereiding van de proeven. Voor nagenoeg alle proeven zijn er problemen opgetreden in de verankering ter hoogte van de eindzones. Dit probleem stelde zich doordat de hechtsterkte tussen beton en bamboe groter was dan de chemische binding tussen bamboe en epoxy. Dit probleem had vermeden kunnen worden indien de inbeddingslengte kleiner was gekozen waardoor de benodigde kracht om de proefstukken uit het beton te trekken ook lager zou zijn.

Voorafgaand aan de uittrekproeven had een controleberekening uitgevoerd moeten worden op basis van de sterkte van de eindverankering. Door rekening te houden met de sterkte van de eindverankering had vervolgens de inbeddingslengte gekozen kunnen worden zodanig dat de faalmodus zou optreden in de vorm van slip. Door herhaaldelijke uitstel van de trialproeven was het noodzakelijk om de proefstukken voor de uittrekproef klaar te maken zonder de capaciteit van de eindverankering te kennen. Eenmaal toen de capaciteit van de eindverankering bekend was, werd verwacht dat deze problematiek zou optreden.



Ondanks dat de inbeddingslengte van 15 cm te groot was om resultaten te verkrijgen, volgt dat dit wel mogelijk is in de literatuur. Zo worden in [18] resultaten verkregen terwijl er eveneens een inbeddingslengte van 15 cm wordt gebruikt. In [33] wordt zelfs een inbeddingslengte van 30 cm gebruikt.

## 6.5 Buigproef

Voor de bepaling van de maximale buigsterkte van bamboe bij een driepuntsbuigproef wordt er gebruikgemaakt van Formule 15, 16 en 17.

$$\sigma_{max} = \frac{M * r}{I} \quad (15)$$

$$M = \frac{F * L}{4} \quad (16)$$

$$I = \frac{\pi}{64} * (D_{uit}^4 - (2 * \frac{D_{uit} - D_{in}}{2})^4) \quad (17)$$

Waarbij:

- $\sigma$  = buigspanning [N/mm<sup>2</sup>]
- M = moment [Nmm]
- F = aangrijpende kracht [N]
- L = lengte proefstuk [mm]
- I = traagheidsmoment [mm<sup>4</sup>]
- r = afstand tot dichtstbijzijnde vezel [mm]

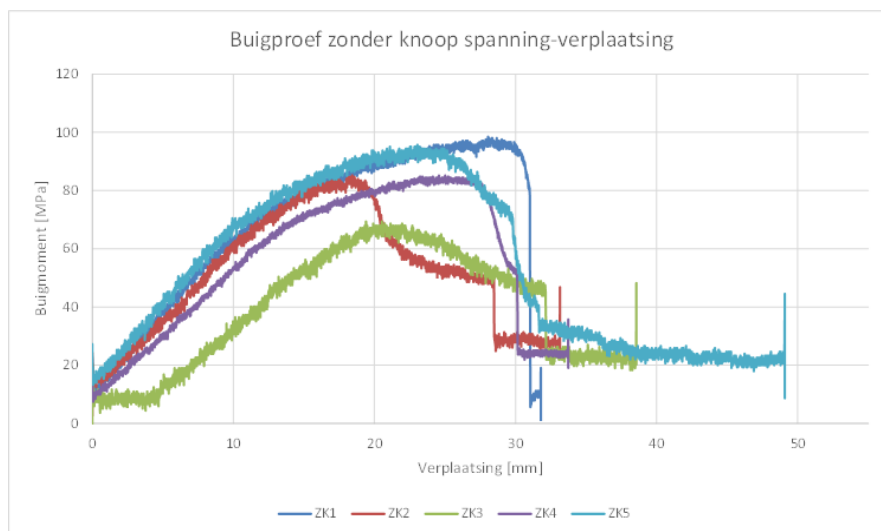
### 6.5.1 Buigproef zonder knoop in overspanning

In Tabel 23 worden de geometrische eigenschappen meegegeven van de vijf proefstukken zonder knoop waarop de buigproef is uitgevoerd.

Tabel 23: Gegevens proefstukken buigproef zonder knoop

Deelproef	Proefstuk nummer	Diameter uitwendig 1 [mm]	Diameter inwendig 1 [mm]	Diameter uitwendig 2 [mm]	Diameter inwendig 2 [mm]	Gemiddelde diameter uitwendig [mm]	Gemiddelde diameter inwendig [mm]	Gemiddelde wanddikte ( $\delta$ ) [mm]	Oppervlakte [mm <sup>2</sup> ]
zonder knoop	ZK1	10,3	5,6	10,1	5,9	10,2	5,75	4,45	80,39
	ZK2	9,2	4,9	9,4	5,6	9,3	5,25	4,05	66,8
	ZK3	8,8	5,6	9,15	5,6	8,98	5,6	3,38	59,38
	ZK4	9,8	5,15	10,9	6	10,35	5,58	4,78	83,63
	ZK5	8,8	4,1	8,8	4,7	8,8	4,4	4,4	60,82

Na uitvoering van de buigproef op de vijf proefstukken zonder knoop in het midden van de overspanning (zie Tabel 23) zijn de resultaten verzameld in Figuur 64. Bijkomend zijn de gegevens van de maximale doorbuiging, maximale buigspanning en doorbuiging bij maximale buigspanning weergegeven in Tabel 24. De bijhorende statistische analyse wordt weergegeven in Tabel 25.



Figuur 64: Resultaten buigproef zonder knoop

Tabel 24: Resultaten buigproef zonder knoop

	doorbuiging,max [mm]	fm,max [MPa]	doorbuiging bij fm,max [mm]
ZK1	31,80	98,54	28,05
ZK2	33,15	85,24	18,43
ZK3	38,57	69,40	20,53
ZK4	33,74	85,17	25,01
ZK5	49,09	95,77	23,05
Gemiddelde ( $\mu$ )	37,27	86,83	23,02

Tabel 25: Statistische analyse buigproef zonder knoop

	doorbuiging,max [mm]	fm,max [MPa]	doorbuiging bij fm,max [mm]
$\mu$	37,27	86,83	23,02
$\sigma$	7,08	11,47	3,76
CV	19%	13%	16%

Figuur 64 geeft weer dat elk proefstuk hetzelfde gedrag vertoont. De spanning loopt eerst geleidelijk op, om vervolgens een soort van plateau te bereiken. Het plateau eindigt waar de maximale buigspanning ( $f_{m,max}$ ) bereikt wordt. De gemiddelde maximale buigspanning voor proefstukken met een diameter van negen à tien millimeter bedraagt 86,83 MPa wanneer er zich geen knoop in het midden van de overspanning bevindt. De standaarddeviatie bedraagt 11,47 MPa met een CV (variatiecoëfficiënt) van 13%.

De grafieken vallen niet helemaal terug naar waar de buigspanning 0 MPa bedraagt. De proefstukken behouden nog een strekte. Dit komt doordat de proefstukken niet volledig falen/breken bij het bereiken van de maximale buigspanning. De proefstukken splijten echter in de langsrichting in twee, zoals zichtbaar in Figuur 65.



Figuur 65: Splinging proefstukken in de langsrichting

Zoals zichtbaar in Figuur 65 is de faalmodus een splijting in de langsrichting van de proefstukken. De proefstukken zelf falen niet volledig waardoor er nog een deel van de sterkte beschikbaar is.

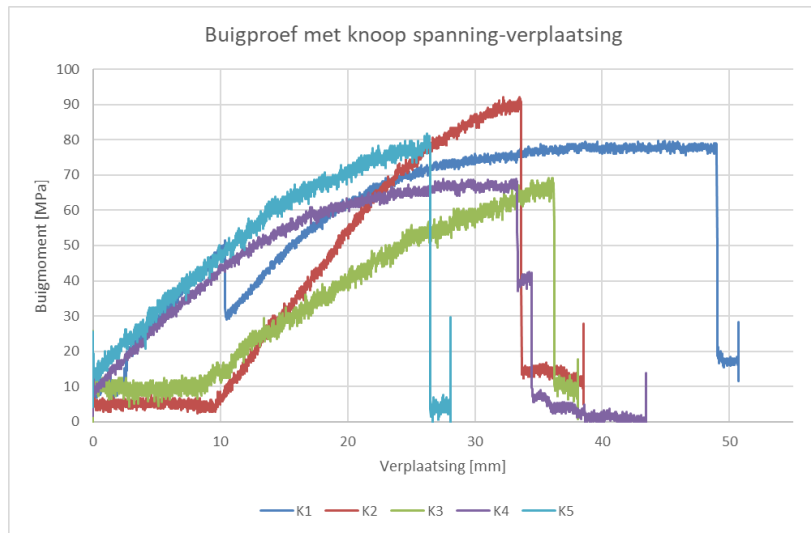
### 6.5.2 Buigproef met knoop in overspanning

In Tabel 26 worden de geometrische eigenschappen meegegeven van de vijf proefstukken met knoop in het midden van de overspanning waarop de buigproef is uitgevoerd.

Tabel 26: Gegevens proefstukken buigproef met knoop

Deelproef	Proefstuk nummer	Diameter uitwendig 1 [mm]	Diameter inwendig 1 [mm]	Diameter uitwendig 2 [mm]	Diameter inwendig 2 [mm]	Gemiddelde diameter uitwendig [mm]	Gemiddelde diameter inwendig [mm]	Gemiddelde wanddikte ( $\delta$ ) [mm]	Oppervlakte [mm <sup>2</sup> ]
met knoop	K1	10,7	5,7	9,15	4,65	9,93	5,18	4,75	77,22
	K2	10,1	5,7	9,5	5,3	9,8	5,5	4,3	74,3
	K3	8,7	5,7	7,5	4,45	8,1	5,08	3,03	48,23
	K4	9,4	5,4	10,6	5,9	10	5,65	4,35	77,21
	K5	8,8	4,6	7,85	4,3	8,33	4,45	3,88	54,17

Na uitvoering van de buigproef op de vijf proefstukken met knoop in het midden van de overspanning (zie Tabel 26) zijn de resultaten verzameld in Figuur 66. Bijkomend zijn de gegevens van de maximale doorbuiging, maximale buigspanning en doorbuiging bij maximale buigspanning weergegeven in Tabel 27. De bijhorende statistische analyse wordt weergegeven in Tabel 28.



Figuur 66: Resultaten buigproef met knoop

Tabel 27: Resultaten buigproef met knoop

	doorbuiging,max [mm]	fm,max [MPa]	doorbuiging bij fm,max [mm]
K1	50,71	79,80	44,93
K2	38,54	92,09	33,49
K3	38,12	69,19	36,10
K4	43,44	68,98	33,24
K5	28,10	81,85	26,24
Gemiddelde ( $\mu$ )	39,78	78,38	34,80

Tabel 28: Statistische analyse resultaten buigproef met knoop

	doorbuiging,max [mm]	fm,max [MPa]	doorbuiging bij fm,max [mm]
$\mu$	39,78	78,38	34,80
$\sigma$	8,27	9,68	6,74
CV	21%	12%	19%

In Figuur 66 is zichtbaar dat de buigspanningen geleidelijk aan toenemen tot het maximum. De gemiddelde maximale buigspanning ( $f_{m,max}$ ) van de proefstukken met knoop in het midden van de overspanning bedraagt 78,38 MPa. De standaarddeviatie bedraagt 9,68 MPa met een CV (variatiëcoëfficiënt) van 12%.

Wanneer de proefstukken falen, valt de totale buigspanning zo goed als volledig terug naar 0 MPa. De proefstukken bieden geen weerstand meer wanneer deze falen in de knoop. Dit komt doordat wanneer de knoop faalt, het proefstuk nagenoeg volledig doorbroken is, zoals zichtbaar in Figuur 67. De proefstukken kunnen hierdoor nagenoeg geen weerstand meer bieden.

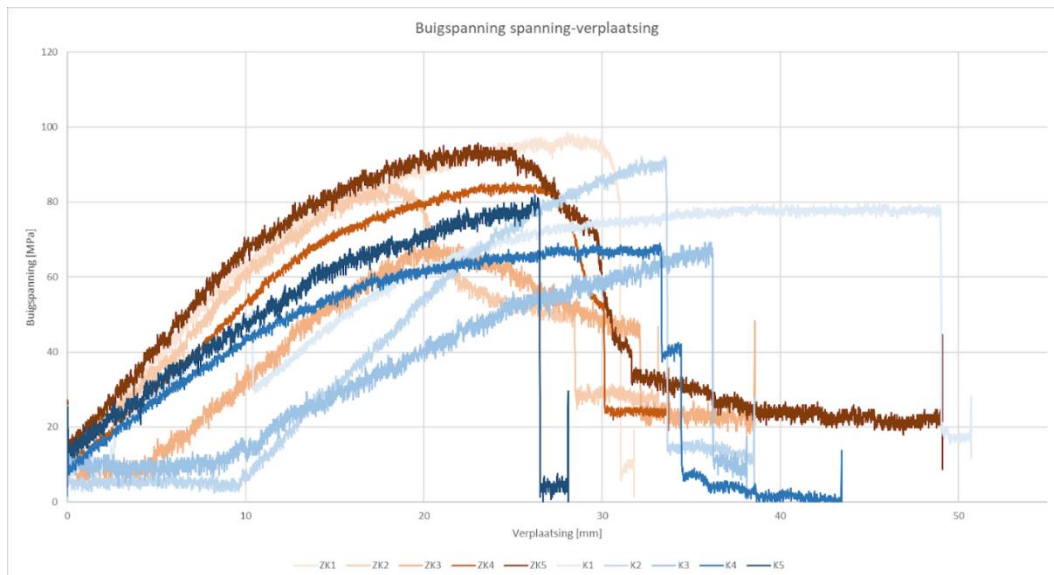


Figuur 67: Falen van de knopen bij buigproef

Zoals zichtbaar in Figuur 67 is de faalmodus een breuk ter hoogte van de knoop. De proefstukken zelf falen dus volledig waardoor er geen sterkte/weerstand meer is, dit is zichtbaar in Figuur 66.

### 6.5.3 Algemeen buigproef met en zonder knoop

Figuur 68 geeft het buigspanningsverloop weer van proefstukken met een diameter van negen à tien millimeter. In totaal zijn er tien proefstukken getest waarvan vijf met een knoop in het midden van de overspanning (K1 t.e.m. K5) en vijf zonder knoop in het midden van de overspanning (ZK1 t.e.m. ZK5). De afmetingen van deze proefstukken zijn respectievelijk terug te vinden in Tabel 23 en 26.



Figuur 68: Buigspanning proefstukken met en zonder knoop

In Figuur 68 zijn de proefstukken zonder knoop weergegeven in een bruin getinte kleur en de proefstukken met een knoop in een blauw getinte kleur.

In figuur 68 is zichtbaar dat de proefstukken zonder een knoop in het midden van de overspanning een hogere buigspanning bereiken in vergelijking met de proefstukken met een knoop in het midden van de overspanning. Dit verschil is echter relatief klein.

Ook is in Figuur 68 zichtbaar dat de proefstukken die geen knoop bevatten, beschikken over een zekere reststerkte na het bereiken van de maximale kracht. Dit is te wijten aan de slijting van de proefstukken in de langsrichting zonder volledig breuk van de proefstukken. De proefstukken die een knoop bevatten falen echter volledig bros waardoor de spanning bijgevolg volledig verloren gaat.

De gemiddelde maximale buigsterkte van de tien proefstukken bedraagt 82,6 MPa. Dit is een lagere buigsterkte dan wat in de literatuur is teruggevonden. Volgens [62] bedraagt de gemiddelde buigsterkte, weliswaar van Bholuka bamboe, gemiddeld gezien 104 MPa wanneer de driepuntsbuigproef wordt uitgevoerd. Dit is 25,9% meer dan de bekomen waarde uit de buigproef op Tonkin proefstukken. Ook [63] hebben de buigsterkte bestudeerd. De studie werd uitgevoerd met behulp van een vierpuntsbuigproef. De resultaten van de buigproef op *Guadua angustifolia* Kunth kolommen waren dat het een buigsterkte van 121 MPa behaalde. Dit is 46,5% meer dan de gemiddelde buigsterkte, verkregen uit de driepuntsbuigproef op Tonkin.

Een rechtstreeks verband tussen de buigsterkte en de treksterkte van proefstukken is niet gevonden. Dit doordat bamboe een natuurlijk, heterogeen materiaal is wat maakt dat er grote schommelingen zijn in waarden. Verder is de treksterkte ook uitgevoerd op strips en de buigproef op bamboestokken, wat maakt dat een relatie hiertussen vinden niet representatief is. Ook zijn de bekomen faalmodi bij de trekproeven niet zoals verwacht. Vaak faalde de trekproeven doordat de stam verbrijzeld werd ter hoogte van de grips. Dit maakt dat er eerder een ondergrens is gevonden voor de treksterkte en geen bovengrens.

Echter kan er aangenomen worden dat bamboe bij implementatie in beton niet gaat falen op buiging. De doorbuiging van structurele elementen gaat van een kleinere orde zijn in vergelijking met de situatie die optreedt bij het uitvoeren van de buigproef. Op basis van dit gegeven zal het faalgedrag bij implementatie van bamboe in beton eerder optreden ten gevolge van het overschrijden van de adhesiekrachten tussen beton en bamboe. De overschrijding van de buigcapaciteit zal niet optreden.

## 7 Ontdekking potentieel van bamboe als vervanger van staalwapening

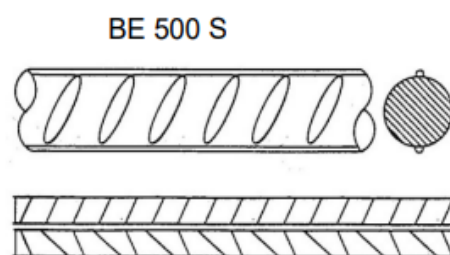
### 7.1 Theoretische achtergrond

De binding tussen beton en staal is reeds goed gekend waardoor het mogelijk is om deze te karakteriseren. Aan de hand van de karakterisatie is het mogelijk om wapening uit te rekenen voor allerhande types van toepassingen. De toepassingen van gewapend beton zijn eindeloos en voor bijna elke situatie is het mogelijk om de bijhorende wapening te berekenen. Voor de berekening van betonwapening steunt het hele rekenmechanisme op enkele basishypothesen. Deze luiden als volgt:

- de vlakke doorsnede (voor belasting) blijft vlak (na belasting);
- perfecte aanhechting tussen beton en staal;
- spanning-rek diagram voor beton en staal;
- zuivere druk beton  $< \varepsilon_{c2}$ ;
- stuik beton  $< \varepsilon_{cu2}$ ;
- rek staal  $< \varepsilon_{ud}$ .

Afhankelijk van het gekozen rekenmechanisme en randvoorwaarden kan deze lijst nog aangevuld worden en kunnen de waarden van de onderlinge parameters verschillen.

Door gebruik te maken van bamboe als wapening moeten de parameters en variabelen van het rekenmechanisme aangepast worden. Zo is de aanname van perfecte hechting tussen beton en bamboe mogelijk niet aanwezig door het gladde oppervlak. Omwille van deze reden is het belangrijk dat de adhesie tussen beton en bamboe gemaximaliseerd wordt om bijgevolg een zo goed samenwerkend geheel te verkrijgen. In de praktijk is dit echter niet eenvoudig om te realiseren (zie 4.1.2 Uittrekproef). Figuur 69 geeft een wapeningsstaaf BE500 weer, dewelke bijna uitsluitend gebruikt wordt in de Belgische bouw.



Figuur 69: Wapeningsstaaf BE500 [64, p. 4]

Figuur 69 toont hoe de ribbels van wapeningsstaven er uitzien. Deze ribbels zorgen ervoor dat slip zo veel mogelijk wordt vermeden en er bijgevolg een maximale binding tussen beide materialen ontstaat. In het geval van gewoon gewapend beton is de binding tussen beiden voornamelijk mechanisch terwijl dat er in voorgespannen beton ook een wrijvingscomponent aanwezig is ter hoogte van het contactoppervlak.

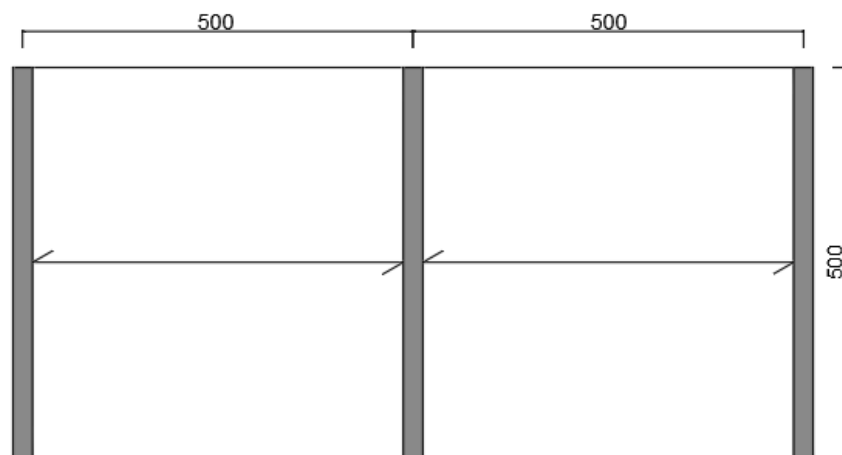
In tegenstelling tot wapeningsstaal beschikt het oppervlak van bamboe niet over deze eigenschappen. Echter beschikt bamboe over knopen die zorgen voor de mechanische wrijving. De tussenafstand van de knopen bedraagt voor kleine diameters (10 - 12 mm) al snel afstanden van 20 cm of groter. Hierdoor kan er voor een rekenmethode niet gesteund worden op de opgewekte wrijving door de knopen. Om deze reden is het nodig om het oppervlak te behandelen, zodanig dat er wel een goede (mechanische) verbinding tussen beide tot stand kan komen. Dit kan gebeuren aan de hand van bitumen zoals gezien in 4.1.2 uittrekproef.

Bij de conventionele manier van wapenen wordt de staalwapening zodanig gekozen dat deze gaat bezwijken voor het beton en dus zal gaan vloeien. Hierdoor zal de ductiliteit van het staal geactiveerd worden waardoor er als het ware een bijkomende sterktecapaciteit wordt ontwikkeld. Bij het gebruik van bamboe als wapening kan dit principe ook gevolgd worden aangezien het faalgedrag van bamboe niet bros is (met uitzondering ter hoogte van de knopen). Echter mag het wapeningspercentage van bamboe niet te laag zijn aangezien de kans op brosse breuk anders toeneemt [35].

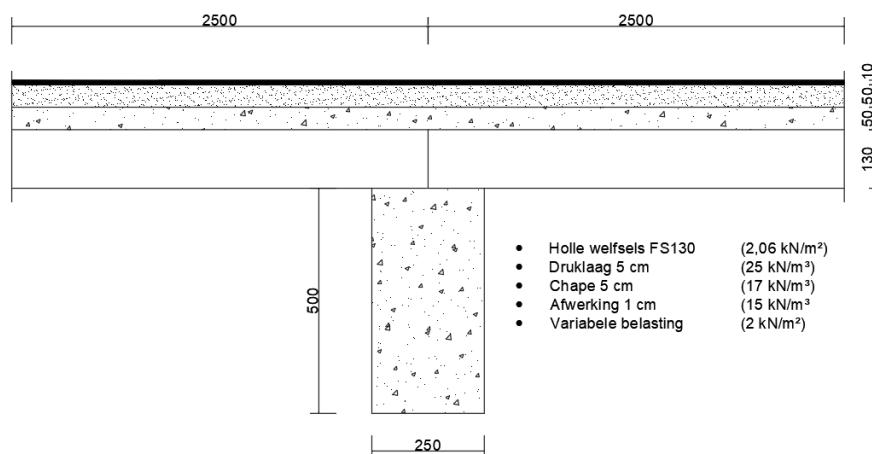
Om te vermijden dat beton bros zal breken is het noodzakelijk om altijd een zekere hoeveelheid minimumwapening aan te brengen. Qua grootteorde kan de minimum staalwapening van een balk geschat worden op 0,33%. Indien er rekening gehouden wordt met het verschil in elasticiteitsmodulus tussen beton en bamboe kan er aangenomen worden dat de minimumwapening met behulp van bamboe zal neerkomen op 3,5% tot 4%. Bovendien moet hierbij ook vermeld worden dat deze waarde er vanuit gaat dat de binding tussen bamboe en beton even sterk is als deze tussen beton en staal. Indien er niet wordt voldaan aan dezelfde bindingssterkte, dan zal de hoeveelheid minimum wapening nog toenemen [35].

## 7.2 Theoretisch rekenvoorbeeld

Voor het theoretisch rekenvoorbeeld wordt een reële vloerplaat beschouwd van 5 m op 5 m, dewelke wordt ondersteund door balken zoals zichtbaar in Figuur 70. Bijkomend wordt de vloeropbouw, inclusief de belastingen, weergegeven in Figuur 71.



Figuur 70: Overspanning theoretisch rekenvoorbeeld



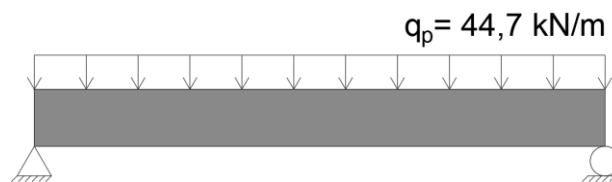
Figuur 71: Vloeropbouw theoretisch rekenvoorbeeld

### 7.2.1 Bepalen belastingen

- Holle welfsels:  $2,06 \frac{kN}{m^2} \rightarrow 10,75 \frac{kN}{m}$
- Druklaag 5 cm:  $25 \frac{kN}{m^3} * 5 m * 0,05 m = 6,25 \frac{kN}{m}$
- Chape 5 cm:  $17 \frac{kN}{m^3} * 5 m * 0,05 m = 4,25 \frac{kN}{m}$
- Afwerking 1 cm:  $15 \frac{kN}{m^3} * 5 m * 0,01 m = 0,75 \frac{kN}{m}$
- Variabele belasting:  $2 kN/m^2 * 5 m = 10 kN/m$

$$q_{tot} = 1,35 * (10,75 + 6,25 + 4,25 + 0,75) + 1,5 * 10 = 44,7 kN/m$$

De krachten zijn omgezet naar een lijnlast, waarbij er rekening is gehouden met de desbetreffende veiligheidsfactoren zoals voorgeschreven in NBN EN 1990. Dit maakt het mogelijk om de draagbalk te beschouwen als isostatische ligger op 2 steunpunten. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 72.



Figuur 72: Verdeelde belasting op een isostatische ligger op 2 steunpunten

### 7.2.2 Schatten dimensies

$$\frac{L}{d} = 15 \quad (18)$$

Waarbij:

- L = lengte [mm]
- d = nuttige hoogte [mm]

$$d = \frac{L}{15} = \frac{5000}{15} = 333 \text{ mm}$$

$$h = d + c + \phi_b + \frac{\phi_s}{2} \quad (19)$$

Waarbij:

- d = 333 mm
- c = 35 mm (aanname)
- $\phi_b = 8$  mm (aanname)
- $\phi_s = 20$  mm (aanname)

$$h = 333 + 35 + 8 + \frac{20}{2} = 386 \approx 390 \text{ mm}$$

$$b = \frac{h}{1,5 \text{ à } 2} \quad (20)$$

$$b = \frac{390}{1,5 \text{ à } 2} \approx 250 \text{ mm}$$

Uit de schatting van de dimensies wordt een balk van 250 x 390 mm bekomen.



### 7.2.3 Corrigeren van $q_{tot}$ inclusief het eigengewicht van de balk

$$q_{tot} = 1,35 * (10,75 + 6,25 + 4,25 + 0,75 + 25 * 0,39 * 0,25) + 1,5 * 10 = 48 \text{ kN/m}$$

### 7.2.4 Bepalen dimensies

De finale afmetingen van de balk worden bepaald op basis van het optimaal gebruik van de wapening. Hierdoor zal de berekende wapening minimaal zijn.

$$d_{opt} = 2,31 * \sqrt{\frac{M_d}{b * f_{cd}}} \quad (21)$$

Waarbij:

- $M_d = \frac{q_{tot} * L^2}{8} = \frac{48 * 5^2}{8} = 150 \text{ kNm}$
- $b = 250 \text{ mm}$
- $b = 250 \text{ mm}$
- $f_{cd} = \frac{0,85 * f_{ck}}{1,5} = \frac{0,85 * 30}{1,5} = 17 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  (veronderstel C30/37)
- $d_{opt} = 2,31 * \sqrt{\frac{M_d}{b * f_{cd}}} = 2,31 * \sqrt{\frac{150 * 10^6}{250 * 17}} = 434 \text{ mm}$

Op basis van  $d_{opt}$  kan vervolgens de hoogte en breedte bepaald worden:

$$h = d_{opt} + c + \phi_b + \frac{\phi_s}{2}$$

### 7.2.5 Corrigeren van $q_{tot}$ inclusief het eigengewicht van de balk

$$q_{tot} = 1,35 * (10,75 + 6,25 + 4,25 + 0,75 + 25 * 0,5 * 0,25) + 1,5 * 10 = 48,9 \text{ kN/m}$$

### 7.2.6 Bepalen wapening (staal)

$$A_s = \frac{M_d}{\zeta * b * f_{yd}} \quad (22)$$

Waarbij:

- $M_d = \frac{q_{tot} * L^2}{8} = \frac{48,9 * 5^2}{8} = 152,8 \text{ kNm}$
- $\zeta = 0,892$  (voor  $\mu_d = 0,187$ )
- $b = 250 \text{ mm}$
- $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2$

$$A_s = \frac{M_d}{\zeta * b * f_{yd}} = \frac{152,8 * 10^6}{0,892 * 250 * 435} = 1575 \text{ mm}^2$$

Op basis van dit rekenvoorbeeld dient de balk gewapend te worden met 2x Ø25 & Ø20 (1610 mm<sup>2</sup>). Vervolgens wordt er gecontroleerd of de wapening voldoet aan de minimumwapening tegen scheurvorming en brosse breuk

$$\text{Scheurvorming: } A_{s,min} = \frac{k_c * k * f_{ct,eff} * A_{ct}}{\sigma_s} \quad (22)$$

Waarbij:

- $k_c = 0,4$  (buiging)
- $k = 1,21 - \frac{0,7 \cdot h}{1000} = 1,21 - \frac{0,7 \cdot 500}{1000} = 0,86$
- $f_{ct,eff} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * 30^{\frac{2}{3}} = 2,896 \text{ N/mm}^2$
- $A_{ct} = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{250 \cdot 500}{2} = 62\,500 \text{ mm}^2$
- $\sigma_s = 160$  ( $\emptyset 25$  en scheurwijdte  $w_k = 0,2$ )

$$\text{Scheurvorming: } A_{s,min} = \frac{k_c * k * f_{ct,eff} * A_{ct}}{\sigma_s} = \frac{0,4 * 0,86 * 2,896 * 62\,500}{160} = 389 \text{ mm}^2$$

$$\text{Brosse breuk: } A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d \\ 0,0013 * b * d \end{array} \right. \quad (23)$$

Waarbij:

- $f_{ctm} = 2,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  (C30/37)
- $b = 250 \text{ mm}$
- $d = d_{opt} = 434 \text{ mm}$
- $f_{yk} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  (GGT)

$$\text{Brosse breuk: } A_{s,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d = 0,26 * \frac{2,9}{500} * 250 * 434 = 164 \text{ mm}^2 \\ 0,0013 * b * d = 0,0013 * 250 * 434 = 141 \text{ mm}^2 \end{array} \right.$$

De gekozen wapening  $2x \emptyset 25$  &  $\emptyset 20$  ( $1610 \text{ mm}^2$ ) is groter dan de minimumwapening tegen scheurvorming ( $389 \text{ mm}^2$ ) en minimumwapening tegen brosse breuk ( $164 \text{ mm}^2$ ).

### 7.2.7 Bepalen wapening (bamboe)

Voor het bepalen van de wapening met bamboe wordt hetzelfde stramien gevolgd als bij staal. Echter zal er nu rekening gehouden worden met de treksterkte van bamboe in plaats van staal. Allereerst wordt een berekening uitgevoerd met de experimenteel bepaalde treksterkte van bamboe ( $136 \text{ MPa}$ ) zonder gebruik te maken van een veiligheidsfactor.

$$A_s = \frac{M_d}{\zeta * b * f_{t,d}} = \frac{152,8 * 10^6}{0,892 * 250 * 136} = 5038 \text{ mm}^2$$

Waarbij:

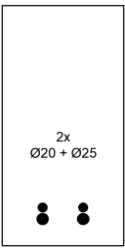
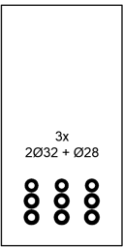
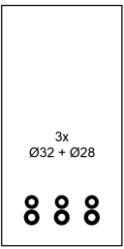
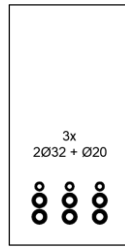
- $f_{t,d} = \frac{f_{t,k}}{1} = \frac{136}{1} = 136 \text{ N/mm}^2$

Voor het bepalen van de wapening van bamboe kan er niet zomaar gekeken worden naar tabellen voor staalwapening. Dit komt doordat bamboe beschikt over een holle sectie en staal over een massieve sectie. Op basis van de opgemeten proefstukken voor het bepalen van de densiteit kan er aangenomen worden dat  $D_i \approx 0,5 D_u$ . Met behulp van dit gegeven is er een tabel opgesteld voor het bepalen van de wapening. Deze kan geraadpleegd worden in Bijlage A.

Om deze balk te wapenen met bamboe is het nodig om  $3 \times 2\text{Ø}32 + \text{Ø}28$  aan bamboe te steken ( $5005 \text{ mm}^2$ ). Uit deze berekening volgt dat de benodigde wapening 3,2 keer meer is bij bamboe ten opzichte van staal. Hierbij is er ook nog geen rekening gehouden met een veiligheidsfactor. Echter moet er ook rekening gehouden worden dat  $136 \text{ MPa}$  een ondergrens is voor de treksterkte van bamboe. Indien er gebruikgemaakt wordt van  $210,4 \text{ MPa}$  zoals in de literatuur, dan volstaat het in dit rekenvoorbeeld om  $3257 \text{ mm}^2$  aan wapening te voorzien [56].

Tot op heden is er nog geen rekening gehouden met de aanwezigheid van veiligheidsfactoren op de treksterkte van bamboe. Tabel 29 geeft het resultaat van de berekeningen weer indien er voor een treksterkte van  $136 \text{ MPa}$  en  $210,4 \text{ MPa}$  gebruikgemaakt wordt van een veiligheidsfactor van 1,3 en 2.

Tabel 29: Resultaten wapeningsberekening staal en bamboe

Treksterkte	Staal $500 \text{ N/mm}^2$	$F_t = 136 \text{ N/mm}^2$ (experimenteel)			$F_t = 210,4 \text{ N/mm}^2$ (literatuur)		
Veiligheidsfactor	1,15	1	1,3	2	1	1,3	2
As [ $\text{mm}^2$ ]	1575	5039	6550	10 077	3257	4234	6514
Wapening	2x $\text{Ø}20 + \text{Ø}25$	3x $2\text{Ø}32 + \text{Ø}28$	/	/	3x $\text{Ø}32 + \text{Ø}28$	3x $2\text{Ø}32 + \text{Ø}20$	/
AutoCAD			/	/			/

Op basis van de resultaten uit Tabel 29 kan er geconcludeerd worden dat het voor dit rekenvoorbeeld niet mogelijk is om een balk te ontwerpen waarbij de experimenteel gemeten treksterkte of de treksterkte uit de literatuur gebruikt wordt in combinatie met een veiligheidsfactor van 2 zoals NBN EN 22156 voorschrijft. Indien de overspanning gereduceerd wordt van 5 m naar 4 m, is het wel mogelijk om de wapening te berekenen met een treksterkte van  $210,4 \text{ MPa}$  en een veiligheidsfactor van 2.

Specifiek voor dit voorbeeld bedraagt de totale lijnlast op de balk  $48,9 \text{ kN/m}$ . Deze is bepaald door gebruik te maken van een reële vloeropbouw in België (lasten van isolatie en leidingen zijn buiten beschouwing gelaten). Ondanks dat het volgens de rekenmethode in Eurocode 2 niet mogelijk is om balken met een overspanning van 5 m of meer te berekenen met een veiligheidsfactor van 2 voor dit geval, zorgt dit mogelijk niet voor problemen voor de toepassing in ontwikkelingslanden. In dit voorbeeld zijn holle welfsels, een druklaag van 5 cm beton en een zandcementvloer van 5 cm beschouwd. Specifiek voor ontwikkelingslanden kan er verondersteld worden dat de vloerplaten niet even sterk en robuust uitgevoerd worden ten opzichte van in België. Dit heeft als gevolg dat de aangrijpende lasten gereduceerd worden.

Algemeen kan er gesteld worden dat het noodzakelijk is om lichtgewicht vloerplaten te voorzien indien er gebruikgemaakt wordt van bamboe als wapening. Zonder lichte vloerplaten is het niet mogelijk om balken met een overspanning van 5 m of meer te ontwerpen waarbij de balken reeds 5 m hart-op-hart gelegen zijn.

Tot slot kan de sterkte van de berekende balk ingeschat worden zoals gedaan in [47] op basis van de formule in [65]. Er wordt voor gekozen om deze uit te voeren bij een treksterkte van 210,4 MPa zonder rekening te houden met een veiligheidsfactor.

$$M_{max,analytisch} = 0,87 * f_y * A_{bt} * d * \left[ 1 - \left( \frac{A_{bt}}{b*d} * \frac{f_y}{f_{ck}} \right) \right] \quad (24)$$

Waarbij:

- $f_y = 210,4 \text{ MPa}$
- $A_{bt} = 3257 \text{ mm}^2$
- $d = 434 \text{ mm}$
- $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

$$M_{max,analytisch} = 0,87 * 210,4 * 3257 * 434 * \left[ 1 - \left( \frac{3257}{250 * 434} * \frac{210,4}{30} \right) \right] = 211,5 \text{ kNm}$$

Op basis van bovenstaande berekening zou een balk met dimensies 250 x 500 mm met een betonkwaliteit C30/37, gewapend met 3257 mm<sup>2</sup> aan bamboe, een buigmoment van 211,5 kNm kunnen ontwikkelen. Verificatie of falsificatie van deze berekening moet volgen uit experimentele proeven.



## 8 Conclusie

De mechanische eigenschappen van Tonkin zijn experimenteel bepaald waarbij het soortelijk gewicht gelijk is aan  $746 \text{ kg/m}^3$ , de treksterkte gelijk is aan  $136 \text{ MPa}$ , hechtsterkte van  $0,61 \text{ MPa}$  zonder adhesieverbetering en  $1,01 \text{ MPa}$  met adhesieverbetering, buigsterkte van  $82,6 \text{ MPa}$  en een elasticiteitsmodulus  $15,2 \text{ GPa}$ .

Specifiek voor de trek- en uittreksterkte moet er benadrukt worden dat de bekomen resultaten echter een ondergrens zijn in plaats van een bovengrens. Dit komt doordat er praktische problemen zijn opgetreden bij het uitvoeren van de proeven waardoor de gewenste faalmodus niet bereikt werd. Gedurende de looptijd van dit onderzoek was het niet mogelijk om oplossingen voor deze problemen te vinden waardoor de testen opnieuw uitgevoerd konden worden.

Voor de trekproef is het nodig om in het midden van de strips een versmalling van de doorsnede te voorzien. Met behulp van deze versmalling wordt er een zwak punt gecreëerd waardoor de faalmodus zal optreden ter hoogte van de versmalling. Dit zorgt ervoor dat de faalmodus niet optreedt ter hoogte van de grips waardoor er bijgevolg een maximale waarde voor de treksterkte wordt verkregen. Bijkomend is het mogelijk om de scheurinitiatie ter hoogte van de grips te vermijden door plaatjes van hout aan beide zijden van de strips te plaatsen. Hierdoor wordt de kracht van de grips beter verdeeld op het oppervlak waardoor de scheurinitiatie ter hoogte van grips wordt uitgesteld / vermeden.

Voor de uittrekproef is het nodig om de inbeddingslengte in beton te reduceren (zeker indien dezelfde betonsterkte C45/55 wordt gebruikt). Voor een optimaal resultaat kan de maximale inbeddingslengte berekend worden op basis van de maximale trekkracht. Hierbij is het belangrijk dat er rekening gehouden wordt met het feit dat de trekkracht moeilijker aangebracht kan worden op de volledige kolom omwille van splinging ten opzichte van strips. Om de voorbereiding van de uittrekproeven en faalkansen zo sterk mogelijk te reduceren is de beste oplossing om een kleine inbeddingslengte te kiezen.

Specifiek voor de implementatie in beton is het noodzakelijk om oppervlakbehandelingen uit te voeren om aantasting en rotting door de toename in vochtgehalte te vermijden. Door de bamboestokken te behandelen met een materiaal als bitumen kan de duurzaamheid gegarandeerd worden. Bovendien is het ook belangrijk om rekening te houden met een afname in de mechanische eigenschappen door een toename aan vochtgehalte. Deze problematiek is niet onderzocht binnen dit onderzoek, maar voor verder onderzoek wordt er geadviseerd om dit wel te onderzoeken aangezien de sterkte van structurele elementen ieder moment en onder alle omstandigheden gegarandeerd moet zijn. Buiten het beperken van absorptie heeft bitumen ook een mechanische functie. Zo zal het bitumen zorgen voor een adhesie die 1,7 tot 1,8 keer sterker is dan zonder behandeling (de waarden zijn ook hier weer een ondergrens). Het belang van de adhesie is niet te onderschatten in beton. Door deze grotere kracht zal de effectiviteit van de bamboe als wapening groter zijn, aangezien een verlies aan adhesie resulteert in een verlies in sterkte.

Bijkomend moet er ook zorgvuldig onderzocht worden hoe de effectiviteit van gestapelde bamboestokken verzekerd kan worden bij de implementatie in beton. Afgaand op de beperkte adhesie bij een enkele bamboestok in beton kan aangenomen worden dat de adhesie van meerdere stokken evenzeer beperkt zal zijn en mogelijk niet evenredig zal toenemen met het aantal gebruikte stokken. Buiten langswapening beschikken structurele elementen ook meestal over beugels om de dwarskracht op te vangen. Beugels uitvoeren met staal is eenvoudig aangezien deze geplooid kunnen worden in een buigbank. Bamboe mist echter deze flexibiliteit waardoor het niet mogelijk is om de klassieke beugels na te bootsen. Om dit probleem op te lossen is verder onderzoek vereist.

Tot slot volgt uit NBN ISO 22156 dat er een veiligheidsfactor van 2 genomen dient te worden op de treksterkte van bamboe. Deze factor is beduidend groter dan de veiligheidsfactor van 1,15 bij staal. Door de combinatie van de hogere veiligheidsfactor en lagere treksterkte van bamboe volgt er dat er vier keer meer wapening uit bamboe nodig is ten opzichte van staal. Afgaand op de beperkte doorsneden van structurele elementen in laagbouwconstructies, volgt er dat het niet mogelijk is om zwaarbelaste structurele elementen met behulp van bamboe als wapening te ontwerpen.

Algemeen kan uit deze masterproef geconcludeerd worden dat bamboe een potentiële vervanger is van wapeningsstaal in structurele elementen van laagbouwconstructies op voorwaarde dat de aangrijpende lasten en overspanningen beperkt zijn.

## Literatuurlijst

- [1] F. Albermani, G.Y. Goh, and S.L. Chan, „Lightweight bamboo double layer grid system,” *Engineering Structures*, vol. 29, nr. 7, pp. 1499-1506, 2007.
- [2] K. Embaye, Ecological aspects and resource management of bamboo forests in Ethiopia [Doctoral thesis], *Silvestria: Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, 2003. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:slu:epsilon-29>
- [3] A. Javadian, I. F. C. Smith, and D. E. Hebel, „Application of Sustainable Bamboo-Based Composite Reinforcement in Structural-Concrete Beams: Design and Evaluation,” *Materials*, vol. 13, no. 3, p. 696, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13030696.
- [4] C.S. Verma, R. Purohit, R.S. Rana, H. Mohit, „Mechanical properties of bamboo laminates with other composites,” *Materials Today*, vol. 4, nr. 2, pp. 3380-3386, 2017.
- [5] K. Ghavami, „Bamboo as reinforcement in structural concrete elements,” *Cement & Concrete Composites*, vol. 27, nr. 6, pp. 637-649, 2005. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002
- [6] L. Cheng, C. Hui, G.V.P. Reddy, Y. Ding and P. Shi, „Internode morphometrics and allometry of Tonkin Cane *Pseudosasa amabilis*,” *Ecology and Evolution*, vol. 7, no. 22, pp. 9651–9660, 2017, doi: 10.1002/ece3.3483.
- [7] A. Sabbir en S.F. Fancy, „Determination of Tensile Property of Bamboo for Using as Potential Reinforcement in the Concrete,” *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, vol 11, nr 5, pp 47 - 51, 2011.
- [8] A. Javadian, I.F.C. Smith, N. Saeidi and D. E. Hebel, „Mechanical Properties of Bamboo Through Measurement of Culm Physical Properties for Composite Fabrication of Structural Concrete Reinforcement,” *Frontiers in Materials*, vol 6, nr 15, pp1-18, 2019. doi.org/10.3389/fmats.2019.00015
- [9] B.V. Subrahmanyam, „Bamboo reinforcement for cement matrices,” *New Reinforced Concrete*. SurreyUniversity Press, Guildford, England, pp. 141–194, 1984.
- [10] *Bamboo cultivational manual - Guidelines for cultivating Ethiopian lowland bamboo*, 1e editie, Unido, Ethiopië, 2009.
- [11] *Bamboo cultivational manual - Guidelines for cultivating Ethiopian highland bamboo*, 1e editie, Unido, Ethiopië, 2009.
- [12] D. Chin, „Making Tonkin Bamboo Fly Rod,” . [online]. Beschikbaar: <https://www.troutcommander.com/making-tonkin-bamboo-fly-rod/>. [Geopend 29 april 2023].
- [13] International Organisation Standardisation, ”About Us,” 2022. [Online]. Beschikbaar: <https://www.iso.org/about-us.html>. [Geopend 9 december 2022].
- [14] International Organisation Standardisation, ”Standards,” 2022. [Online]. Beschikbaar: <https://www.iso.org/standards.html>. [Geopend 9 december 2022].
- [15] *Bamboo structures - Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms - Test methods*, NBN ISO 22157:2021, NBN, Brussel, België, juni. 2021. [online]. Beschikbaar: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/586603?I=E>
- [16] J.G. Moroz, S.L. Lissel, M.D. Hagel, „Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls,” *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 125-137, 2014.
- [17] P. Liu, Q. Zhou, N. Jiang, H. Zhang and J. Tian, „Fundamental research on tensile properties of phyllostachys bamboo,” *Results in Materials*, vol. 7, nr. 100076, 2020.
- [18] N.L. Rahim, N.M. Ibrahim, S. Salehuddin, S.A. Mohammed en M.Z. Othman, „Investigation of bamboo as concrete reinforcement in the construction for low-cost housing industry,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol 476, nr. 012058, 2020.
- [19] S. Chellamuthu, S. Muthu, M.N.Ali, „Experimental study on tensile behavior of multi wall carbon nanotube reinforced epoxy composites,” *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 8, nr. 7, pp. 3253-3259, 2012.



- [20] M.A.P. Handana, B. Surbakti, D.D. Harisdani, R. Karolina, and T.F. Rizki, „Compressive and tensile strength of bamboo species”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 519, p. 012026, 2020.
- [21] A. Dey and N. Chetia, „Experimental study of bamboo reinforced concrete beams having various frictional properties,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, pp. 436–444, 2018. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.103
- [22] V.R. Wairagade and I. P. Sonar, „Bamboo Concrete Bond Strength,” *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 9, nr. 1, pp. 747-752, 2019.
- [23] A. Javadian, M. Wielopolski, I.F.C. Smith and D.E. Hebel, „Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 110-117, 2016. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.084
- [24] K. Ghavami, „Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 17, nr. 4, pp 281-288, 1995.
- [25] W.J. Beranek. Krachtswerking in gebouwen deel 4 spanningen. (2001, 2de semester). Krachtswerking. Delft, Nederland, TU Delft.
- [26] Y. Deng en C. Peng, „Experimental study on bending mechanical properties of moso bamboo”, *E3S Web of Conferences*, vol. 293, nr. 03010, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202129303010
- [27] E. Obataya, P. Kitin, and H. Yamauchi, „Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber–foam composite structure”, *Wood Science and Technology*, vol. 41, no. 5, pp. 385–400, 2007.
- [28] W. Liese, „Anatomy and properties of bamboo,” *International Bamboo Workshop (Hangzhou)*, pp. 196-208, 1985.
- [29] C.S. Verma, V.M. Chariar, R. Purohit, „Tensile Strength Analysis of bamboo and Layered Laminate Bamboo composites,” *International Journal of Engineering research and applications*, vol. 2, nr. 2, pp. 1253-1264, 2012.
- [30] P.J. Kaur, K.K. Pantand en G. Kaushik, „Properties and Importance of Various Bamboo Species for Multi-Utility Applications,” *Sustainable Agriculture, Forest and Environmental Management*, 2019, pp. 251–283. doi: 10.1007/978-981-13- 6830-1\_8
- [31] A. Nordahlia, U. Anwar, H. Hamdan, A. Zaidon, M. Paridah, en O.A. Razak, „Effects of age and height on selected properties of Malaysian bamboo (*Gigantochloa levis*)”, *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 24, nr. 1, pp. 102–109.
- [32] A.H.D. Abdullah, N. Karlina, W. Rahmatiya, S. Mudaim, Patimah en A.R. Fajrin, „Physical and mechanical properties of five Indonesian bamboos,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 60, nr. 012014, 2017.
- [33] V. Harelimana, J. Zhu, J. Yuan en C. Uwitonze, „Investigating the bamboo as alternative partial replacement of steel bars in concrete reinforcement members,” *The Structural Design of Tall Special Buildings*, vol. 31, nr. 6, pp. 1-18, 2022.
- [34] S. Jakovljević, D. Lisjak, Ž. Alar en F. Penava, „The influence of humidity on mechanical properties of bamboo for bicycles,” *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 35-48, 2017.
- [35] H. Archila, S. Kaminski, D. Trujillo, E. Zea Escamillaand K.A. Harries, „Bamboo reinforced concrete: a critical review,” *Materials and Structures*, vol. 51, nr. 102, 2018,
- [36] S. Kaminski, A. Lawrence, A. Lawrence, D.J.A. Trujillo, en L.L Felipe, „Structural use of bamboo: Part 3: Design values,” *Structural Engineer*, vol. 94, nr. 12, pp. 42-45, 2016.
- [37] M. Ogunbiyi, S.O.A. Olawale, O.E. Tudjegbe, S. Akinola, „Comparative Analysis Of The Tensile Strength Of Bamboo And Reinforcement Steel Bars As Structural Member In Building Construction,” *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 4, nr. 11, pp. 47-52, 2015.

- [38] M.K. Chahrour, M.A. Hosen, Y. Goh, T.Y. Tong, S.P. Yapand en M.A. Khadimallah, „Failure Mechanisms of Structural Bamboo Using Microstructural Analyses,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1155/2021/1571905.
- [39] F. Chung and W. K. Yu, „Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings,” *Engineering Structures*, vol. 24, nr. 4, pp. 429–442, 2002.
- [40] M. Daud, N.M. Nor, M.A. Yusof, A.A.M.A. Bakhri, and A.A. Shaari, „The physical and mechanical properties of treated and untreated Gigantochloa Scortechinii bamboo,” *International Conference on Engineering and Technology*, vol. 1930, nr. 020016, 2018.
- [41] P.Liu, Q.Zhou, N. Jiang, H. Zhang en J. Tian, „Fundamental research on tensile properties of phyllostachys bamboo,” *Results in Materials*, vol. 7, nr. 100076, 2020
- [42] M.A. Sabbir, S.M.A.Hoq, en S.F. Fancy, „Determination of Tensile Property of Bamboo for Using as Potential Reinforcement in the Concrete,” *Engineering Materials Science*, 2011.
- [43] N.S. Kathiravan, R. Manojkumar, P. Jayakumar, J. Kumaraguru en V. Jayanthi, „State of art of review on bamboo reinforced concrete,” *Materialstoday: Proceedings*, vol. 45, nr. 2, pp. 1063-1066, 2021. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.159
- [44] L. Kaushal en M.C. Maurya, „Study on adhesion and bonding performance between bamboo and concrete,” *I-Manager's Journal on Structural Engineering*, vol. 6, nr. 3, pp. 1-7, 2017. doi:https://doi.org/10.26634/jste.6.3.13719
- [45] D. Sharma en R. Maheshwari, „Bonding Behaviour of Bitumen Coated Bamboo Reinforcement in Beam Specimen,” *IJESC*, vol. 9, nr. 5, pp. 22624 - 22629, 2022.
- [46] M. Mulyati en A. Arman, „The Evaluation of Bond Strength of Bamboo Reinforcement in Concrete,” *International Conference on Technology, Innovation, and Society*, pp. 690-695, 2016.
- [47] D. Bhonde, P.B. Nagarnaik, D.K. Parbat, U.P. Waghe, „Experimental Analysis of Bending Stresses in Bamboo Reinforced Concrete Beam,” *International Conference on Recent Trends in Engineering and Technology*, 2014.
- [48] A. Agarwal, B. Nanda & D. Maity, „Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns,” *Construction and Building Materials*, vol. 71, pp. 610-617, 2014. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.011
- [49] M. Terai, & K. Minami, „Fracture behavior and mechanical properties of bamboo reinforced concrete members,” *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 2967-2972, 2011.
- [50] FEBELCEM, "Degelijk beton maken met de hand." Federatie van de Belgische Cementnijverheid. [https://www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/Fiches-techniques/nl/exsud\\_nl.pdf](https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/Fiches-techniques/nl/exsud_nl.pdf) (geraadpleegd op 4 maart 2023).
- [51] D. Bhonde, D.K. Parbat, K. Parbat, U.P. Waghe, „Tension test on male bamboo (dendrocalmus strictus),” *International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering*, vol. 2, nr. 1, pp. 51-54, 2013.
- [52] *Bamboo structures - Bamboo culms - Structural design (ISO 22156:2021)*, NBN ISO 22156:2021, NBN, Brussel, België, juni. 2021. [online]. Beschikbaar: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/588648?l=E>
- [53] Q. Zhou, J. Tian, P. Liu en H. Zhang, „Test and prediction of mechanical properties of Moso bamboo,” *Engineered fibres and fabrics*, vol. 16, pp. 1-11, 2021.
- [54] B.V. Subrahmanyam, „Bamboo reinforcement for cement matrices,” *New Reinforced Concrete*. SurreyUniversity Press, Guildford, England, pp. 141–194, 1984.
- [55] A. L. Mohmod, A. H. Amin, J. Kasim en M. Z. Jusuh, „Effects of anatomical characteristics on the physical and mechanical properties of Bambusa blumeana,” *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 6, nr. 2, pp. 159–170, 1993.
- [56] ] F. Penava, S. Jakovljević en Z. Alar, „Bamboo Bicycle - Past or Future,” *INDECS*, vol. 14, nr. 1, pp. 70-79, 2016.

- [57] Noviostaal. „S500MC.” Noviostaal. <https://www.noviostaal.nl/assortiment/en-10149-22013-s500-mc/> (geraadpleegd op 10 mei 2023).
- [58] Tosec. „Spanning-rek diagram.” Tosec. <https://tosec.nl/nl/wiki/spanning-rek-diagram/> (geraadpleegd op 10 mei 2023).
- [59] *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen (+AC:2010)*, NBN EN 1992-1-1, NBN, Brussel, België, jan. 2005. [online]. Beschikbaar: <https://edu.mynbn.be/pdfMeta/RO/261904?l=N>
- [60] Betonlexicon. “Hydratatiewarmte.” Betonlexicon. <https://www.betonlexicon.nl/H/hydratatiewarmte> (geraadpleegd op 19 april 2023).
- [61] A.A. Amiruddin, H. Parung, N. Sibela, M.N. Fajar en H. Arifin, „The Effect of Bamboo WaterContent on The Tensile Strength of Bamboo,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1117, nr. 012008, 2022.
- [62] A. Chatterjee en R. Bhowmik, "Experimental determination of flexural strength of Bholuka bamboo (BambusaBalcooa) of Assam, India," *Materials Today*, vol. 76, no. 3. p.585-589, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.168>
- [63] D. Trujillo, S. Jangraand J. M. Gibson, “Flexural properties as a basis for bamboo strength grading”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 170, no. 4, pp. 284–294, 2017, doi: 10.1680/jstbu.16.00084.
- [64] BETONSTAAL – GERIBDE en GEDEUKTE STAVEN – GERIBDE en GEDEUKTE DRAAD met hoge ductiliteit, herziening 12, OCBS, Brussel, België, 2021.
- [65] *Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice [CED 2: Cement and Concrete]*, IS 456:2000, IS, New Delhi, India, april. 2007. [online]. Beschikbaar: <https://www.iitk.ac.in/ce/test/IS-codes/is.456.2000.pdf>

## Bijlagen

### Bijlage A: Berekenen wapening met behulp van bamboe

n $\phi$	$\phi 12$	$\phi 14$	$\phi 16$	$\phi 20$	$\phi 25$	$\phi 28$	$\phi 32$
1	85	115	151	236	368	462	603
2	170	231	302	471	736	924	1206
3	254	346	452	707	1104	1385	1810
4	339	462	603	942	1473	1847	2413
5	424	577	754	1178	1841	2309	3016
6	509	693	905	1414	2209	2771	3619
7	594	808	1056	1649	2577	3233	4222
8	679	924	1206	1885	2945	3695	4825
9	763	1039	1357	2121	3313	4156	5429
10	848	1155	1508	2356	3682	4618	6032