

Eigen ontwerp en ontwikkeling van een bio-racefiets

Ward Thienpont, Bert Camerlinck

Promotoren: prof. dr. ir. Wim Van Paepegem, dr. ir. Ives De Baere

Begeleider: ir. Joachim Vanwalleghem

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Toegepaste Materiaalwetenschappen

Voorzitter: prof. dr. ir. Joris Degrieck

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2012-2013



Voorwoord

Als masterstudenten werktuigkunde-elektrotechniek in de mechanische energietechniek was het maken van composieten nog relatief onbekend terrein. Door de interesse in fietsen in het algemeen en wielrennen in het bijzonder sprak deze thesis ons toch onmiddellijk aan. Bovendien was er het feit dat deze thesis een enorm experimenteel karakter had, wat een welgekomen afwisseling was na vier jaar theoretische studie.

In het jaar dat we met composieten zijn bezig geweest, hebben we veel geleerd over hoe de ontwikkeling van een productieproces in zijn werk gaat en hoe composieten worden gemaakt. Tevens was het een leerrijk proces op gebied van creativiteit en planning.

Dit alles was ons uiteraard niet gelukt zonder de hulp van velen, die we zouden willen bedanken. Als eerste willen we graag onze begeleider Joachim Vanwalleggem en onze promotoren Prof. Dr. Ir. Wim Van Paepegem en Dr. Ir. Ives De Baere bedanken voor hun vele hulp bij het uitdenken en verbeteren van de verschillende productiemethodes en de verwerking van de resultaten.

Als tweede zouden we graag Luc Van den Broeke en Pascal Baele bedanken. Slechts dankzij hun technische kennis en capaciteiten was het mogelijk onze uitgedachte methodes in praktijk te brengen.

Verder willen we onze collega's studenten bedanken om ons tijdens de vele uren in het labo gezelschap te houden. De fietsenwinkel Fiets! voor het gebruik van talloze binnenbanden voor de vervaardiging van onze fiets.

Tot slot willen we graag onze families bedanken voor de steun tijdens onze studies en dit thesisjaar.

Toelating tot bruikleen

Permission for use of content

De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.

3 juni 2013

The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use.

In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.

June 3th, 2013

Eigen ontwerp en ontwikkeling van een bio-racefiets

door

Bert Camerlinck en Ward Thienpont

Promotoren: prof. dr. ir. Wim Van Paepegem, dr. ir. Ives De Baere

Begeleider: Joachim Vanwalleghem

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde-elektrotechniek

Vakgroep Toegepaste Materiaalwetenschappen

Voorzitter: prof. dr. ir. Joris Degrieck

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2012-2013

Samenvatting

Deze thesis is gericht op het ontwerpen en produceren van een bio-racefiets bestaande uit milieuvriendelijke en duurzame materialen: vlasvezel en biohars om zo een biologisch vezelversterkte kunststof te maken. De mechanische eigenschappen van UD-vlasvezel composiet wordt opgemeten, essentiële informatie voor numerieke simulaties. De productiemethodes worden uitgebreid beschreven. Een frequentietest en driepuntsbuigproef worden uitgevoerd op een glasvezel-, carbonvezel- en vlasvezelbuis. Tenslotte wordt het bio-frame onderworpen aan een stijfheidstest.

Kernwoorden

Vlas, biohars, productietechnieken, materiaaleigenschappen

Extended Abstract

Custom design and development of a bio-racebike

Bert Camerlinck and Ward Thienpont

Supervisors: Wim Van Paepegem, Ives De Baere, Joachim Vanwallegem

Abstract – This thesis aims to design and produce a bio-race bike consisting of environmentally friendly and renewable components: flax-fiber and bio-resin to make a ‘bio’-fiber-reinforced plastic. In this text, the mechanical properties of flax UD reinforced epoxy are measured, which is essential information to make numerical simulations. All the different ways that are tested to make the frame parts are listed. A frequency test and a three point bending test are implemented on a glass-fiber-, carbon-fiber- and flax-fiber tube. Finally, a test is executed on the flax-fiber frame.

Keywords – Flax, Bio-resin, production techniques, material properties

I. Introduction

COMPOSITE MATERIALS become more and more important in today’s technologies of modern materials and they’re being used in various applications, ranging from lightweight components for transport to turbine blades for windmills. The fiber-reinforced plastics are gaining popularity in high-performance products that need to be light and strong enough to thrive under severe conditions. There are also a number of disadvantages linked to fiber-reinforced plastics. The production cost remains relatively expensive and the recycling of the material is a major issue. This thesis aims to design and produce a bio-race bike consisting of environmentally friendly and renewable components: flax-fiber and bio-resin to make a ‘bio’-fiber-reinforced plastic. The choice of these components stems from a few aspects: 1. Flax is renewable and a product of our region, 2. The existence of bio-resin with equivalent properties of epoxy resins and 3. The non-toxicity of bio-resin. What follows is a description of the steps taken to fabricate the frame. Some measurements and test results of the material and components will not be retained from the reader.

II. Composite Materials

COMPOSITE MATERIALS are materials that consist of two or more distinct phases with different physical and chemical properties. When combined, the composite has better properties than the constituent materials. When they are well chosen, one gets materials with a higher

stiffness, higher tensile or compressive strength, materials that are lighter, ...

Fiber-reinforced plastics consist of fibers, embedded in a binder, called the matrix, and separated from each other by a boundary surface. This boundary surface is accomplished by a post-treatment of, or a coating (= sizing) on the fibers.

Fibers can be found in different forms, like roving and yarns, but also combined to fabric or unidirectional fiber mats (UD-material). Many of those forms are used in the production processes.

III. Flax-fiber and Bio-resin

Bio in relation to materials is not clearly defined or a legally protected term. Usually, bio means that a considerable part of the material is based on a bio-based raw material. The proportion of the biological compound can come from the fiber or the resin, or both. Sometimes the term ‘bio’ is given to a product that contains only 5 % biological materials. This makes clear that the ‘bio’-label is not distinctive. In this thesis, it is intended to work with 100 % biological components, but due to unexpected problems with the delivery and curing problems of the bio-resin, the choice has been made to work with epoxy-resin. If the troubles are solved, it is very easy to change the resin. At the end of the thesis, a sample made of UD-flax-fiber and bio-resin was made, to prove that it is possible.

Today, flax is already widely used in renewable projects, even in cycling [1]. The similar properties with glass-fiber and good price of flax-fiber make it interesting for companies to get involved. Table I give some properties for glass- and flax-fibers. It’s seen that flax-fiber is a worthy replacement for glass-fiber, the relative stiffness is a lot better.

TABLE I: Properties of Glass- and Flax-fibers [2]

	GLASS-FIBER	FLAX-FIBER
Price [€/€glass-fiber]	1	1.10
Strength [MPa]	2000 – 3000	500 – 1100
Stiffness [GPa]	72	50 – 70
Strain by fracture [%]	2.5	1.3 – 3.3
Density [g/cm ³]	2.55	1.5
Relative Stiffness [GPa/g]	28.2	33.3 – 46.7
Relative Strength [MPa/g]	784.3 – 1176.5	333.3 – 733.3

Current examples of bio-resin in use are difficult to find, due to its novelty on the markets. The bio-resin is provided by Vosschemie Belgium [3].

IV. Material Characterization

A. Producing test specimens

Test specimens were made out of UD-flax-fibers with and without sizing combined with epoxy-resin, to try and find a difference in properties. The samples were made using the VIP-lineup in the laboratory. VIP stands for Vacuum Infusion Processing. The samples consist of 10 layers of UD-flax-fiber, stacked in the same direction. They form a 3 mm thick plate which serves 8 test samples of 230 mm by 30 mm. 4 samples in the longitudinal direction (0°-direction) and 4 in the transverse direction (90°-direction). Two strain gauges are placed on each sample to measure the longitudinal strain ε_{11} and the transverse strain ε_{22} during the tensile test. The mechanical properties are determined in accordance with the appropriate ASTM standards.

B. Results

The results are given in Table II:

TABLE II: Results of the tensile test on flax UD

Quantity	Unit	Flax UD with Sizing	Flax UD without Sizing
E_{11}	[GPa]	23.74	23.44
E_{22}	[GPa]	5.51	5.75
$\varepsilon_{11,ult}$	[%]	1.88	2.16
$\varepsilon_{22,ult}$	[%]	0.76	1.2
$\sigma_{11,ult}$	[MPa]	256.3	265.7
$\sigma_{22,ult}$	[MPa]	31.41	33.88
ν_{12}	[-]	0.36	0.35
ν_{21}	[-]	0.078	0.070

V. Frame Design

Before designing the frame, some considerations have to be made. It has to be possible to make the frame with the installations that are available at the University of Ghent. Also, the production process has to be compatible with both epoxy and bio resin. The traditional triangle-shaped frame answers both needs. Other possible shapes always have more complex structures where the strength requirements would be a bigger problem. Therefore, the triangle shape will be chosen.



FIG.1: Frame without chainstay

This triangle will be build up out of tubes and lugs. The lugs will conduct the tubes into the preferable geometry. The shape of the lugs and tubes will be determined during the production methods investigation, see fig.1.

VI. Production Methods

A. Tubes

Because of the presence of a filament winding machine, this process is considered first for manufacturing the tubes. Filament winding has lots of applications because of its strength in multiple directions. This production method is very good with synthetic fibers. These fibers consist of only one long string that has a wide, flat structure, fig.2.



FIG.2: Filament winding with glass-fiber

Flax fiber, however, is build up out of multiple short fibers that are pressed together and get their strength out the friction between the fibers. These properties make flax fiber not ideal for filament winding. The results also show that this assumption is correct and therefore, filament winding will be no longer considered. Another production method is called draping. This method uses mats of flax fiber that are draped over a mold.

The mold needs to have some properties. It needs some friction with the mats. Otherwise, no tension can be put on the mats what is necessary for a good outer surface. Also, it has to be possible to remove the mold, or the mold has to be very light. A material that fits those needs is polyurethane, it is light, very easy editable and has a rough surface. In a first try the molds will be chosen cylindrical, see fig.3.



FIG.3: Mold out of polyurethane



FIG.4: Vacuum infusion proces

There are multiple ways of impregment of the resin. Three possibilities will be investigated and compared.

The first one is using vacuum infusion. For this method, the mold, with the mats, is placed in a vacuum bag. This vacuum bag has two joints, see fig.4. One is connected with a vacuum pump and the other one is connected with a resin bath. A second one is applying the resin to the mats before they are draped over the mold. Afterwards vacuum is applied to extract the remaining air. The last possibility is the use of prepreg mats. These are mats where resin is applied in a previous process, and where the curing process doesn't initiate until a certain temperature is reached. Prepreg mats aren't yet available whit bio resin, therefore another method should be found, but for possible use in the future, it is investigated.

The results aren't yet satisfying. Every method still has a lot of remaining air in the tubes. Because of the porous structure of polyurethane the mold is covered with a small layer of latex in further tests. The methods are tried again and the dry draping combined with vacuum infusion gifs the best results.

However, the outer surface of the tubes isn't good. The lugs and the tubs have to fit, which makes a better outer surface necessary. The solution to this problem is the use of an outer mold. Because of time and money restrictions, a mold made out of aluminum isn't possible. Therefore a mold out of glass fiber and epoxy is produced. To have a good outer surface of the tubes, a layer of polystyrene is used at the surface of the mold, see fig.5.

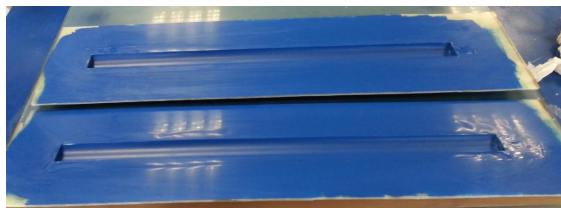


FIG.5: Glass-fibermold with polystyrene(blue)

With this method, polyurethane is no longer used as an inner mold. It is necessary to put pressure on the inside of the fibers, so there would be no wrinkles in the tubes. To apply this pressure, an inner tube of a bicycle is used. Broken ones are recycled for this.

The results are much better than any previous tried method. The outer surface is very clean and the fiber layers are pushed tightly together.

B. Lugs

For the manufacturing of the lugs, similar methods are tried like the ones just for manufacturing tubes. Because of the good outer surface and diameter of the tubes, a good inner diameter of the lugs is preferred. The methods with polyurethane are therefore a good solution. Again, latex is applied (fig.6) and the three methods are used. The method where dry draping is combined with vacuum infusion gives the best results and will be used.



FIG.6: Polyurethane lug with latex



FIG.7: Draped lug in vacuum bag



FIG.8: Finished lug



FIG.9: Finished frame

C. Assembly

The lugs and tubes are glued together. The used glue is an epoxy-based glue. The contact surfaces of both tubes and lugs are made rough. The frame is assembled and the slits between lugs and tubes are filled with glue, see fig.9.

VII. Tests

A. Eigenfrequencies

Tubes are made out of flax fiber, glass fiber and carbon fiber. All three tubes are made with the same manufacturing method: the glass fiber outer mold. These tubes are tested and the results are compared.

The first test is to determine the eigenfrequencies of the tubes. Therefore the tubes are hung at two stretchers. An accelerometer is placed at the bottom of the tube to measure the displacement during time. Impact is applied on different places of the tube so the eigenfrequencies en eigenmodes can be determined.

Also a numerical simulation is executed to determine the eigenfrequencies. The material properties of table 2 are used in the simulation. Thus, a comparison can be made, see table 3.

TABLE 3: results frequency test

	1 st mode [Hz]	2 th mode [Hz]	3 th mode [Hz]
Flax-tube	520	1280	2200
Glass-tube	650	1610	/
Carbon-tube	1025	/	/
Simulated flax-tube	550	1340	2290

B. Three-point bending test

A second test is a three-point bending test, fig.10. Here the strength of the tubes are tested to know their displacement when forces are applied.

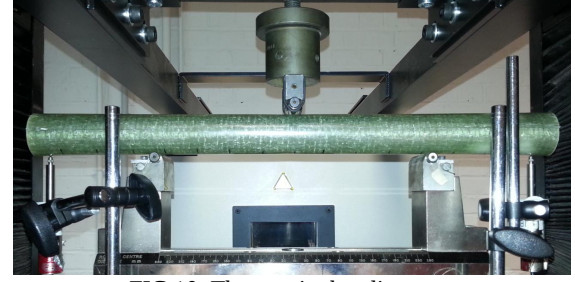


FIG.10: Three-point bending test

TABLE 4: results of the three-point bending test

MATERIAL	E_t [N/mm]	MASS [g]	SPECIFIC BENDING STIFFNESS
			[N/mm/g]
Glassfibertube	67.5	350.85	0.19
Carbontube	39.7	113.06	0.35
Flaxfibertube	29.8	202.55	0.15

C. Frame quality

The frame quality is indicated by the displacement of the frame when a certain force is applied on the pedals. The frame is clamped at the head tube. A force is applied at the bottom bracket. Both force on and displacement of the bottom bracket are measured.

When a force of 100 Newton is applied, the bracket moves for 4.5 mm. The displacement is equal to the applied force, so with a force of about 800 Newton (the average weight of a professional cyclist) the displacement would be 36 mm, which is intolerable.

Also, a force at one side of the frame is applied, a moment at the bracket is resulted. This moment initiates a distortion of the bracket. The direction of the force is parallel to the headtube: 17° out of the vertical direction. At both sides, the displacement is measured, out of which the distortion can be calculated.

A distortion of 1° is measured when a force of 105,4 Newton is applied on one of the pedals. With a force of 800 N gives this a distortion of 7,6°, which is again intolerable.

These tests give an idea of the displacement the frame gets, at normal working conditions. Both tests give intolerable results. During the tests, it is noticed that most of the displacement is centered at the head tube. Apparently, this lug is not strong enough and the quality of the frame would improve a lot with a better head tube.

VIII. Conclusion

The focus of this thesis was the manufacturing process of a bicycle frame made out of flax fibre and bio-based resin. Because of troubles with the resin, this part is replaced by epoxy-resin.

After comparisons of different production methods, an outer mold gives the best results for the manufacturing of tubes. A polyurethane inner mold gives the best results for the production of lugs. Both processes are combined with vacuum infusion.

The quality of the frame and the material is tested and compared to classical materials. Unfortunately, these results aren't good for the flax fibre samples. A part of the failure can be considered as the result of imperfections of the still evolving process. But the characteristics of the flax show that the classic carbon fiber bike properties will never be equaled.

References

- [1] MUSEEUW BIKES, <http://museeuw bikes.be>, maart 2013.
- [2] VAN DEN OEVER M. en MOLENVELD K., Biocomposieten 2012: Natuurlijke vezels en bioharsen in technische toepassingen, Wageningen UR, 2012
- [3] VOSSCHEMIE, <http://www.vosschemie-benelux.com/>, September 2012

Inhoudsopgave

VOORWOORD.....	I
TOELATING TOT BRUIKLEEN PERMISSION FOR USE OF CONTENT	II
EIGEN ONTWERP EN ONTWIKKELING VAN EEN BIO-RACEFIETS	III
SAMENVATTING.....	III
KERNWOORDEN.....	III
EXTENDED ABSTRACT.....	IV
INHOUDSOPGAVE.....	IX
SYMBOLEN- EN AFKORTINGENLIJST.....	XI
FIGURENLIJST	XII
TABELLENLIJST.....	XVI
HOOFDSTUK 1 INLEIDING.....	1
HOOFDSTUK 2 INLEIDING TOT COMPOSITMATERIALEN.....	3
2.1 COMPOSITEN – DEFINITIE.....	3
2.1.1 Vezels	5
2.1.2 Matrices	7
2.2 VOORKOMEN EN TOEPASSINGEN VAN VEZELVERSTERKTE KUNSTSTOFFEN	9
2.2.1 Algemeen voorkomen	9
2.2.2 Toepassingen.....	12
2.3 PRODUCTIEMETHODES	13
2.3.1 Grondstoffen.....	13
2.3.2 Wet hand lay-up	15
2.3.3 Persgieten (E: Compression moulding)	16
2.3.4 Harsinjectie (Resin injection).....	17
2.3.5 Vacuum bag, pressure bag en autoclaaftechniek.....	17
2.3.6 Pultrusie	18
2.3.7 Wikkelen (E: Filament winding).....	19
2.3.8 Smitgieten (E: Injection moulding)	20
HOOFDSTUK 3 LITERATUURSTUDIE	21

3.1	BIOCOMPOSITEN.....	21
3.1.1	<i>Definitie</i>	21
3.1.2	<i>Biologische drivers</i>	21
3.1.3	<i>Toepassingen</i>	22
3.2	NATUURLIJKE VEZELS: VLAS	23
3.3	BIOHARS	29
3.4	RACEFRAMES	29
3.4.1	<i>Geschiedenis</i>	29
3.4.2	<i>Productiemethodes</i>	31
HOOFDSTUK 4	MATERIAALKARAKTERISATIE	33
4.1	PRODUCTIE TESTSAMPLES	33
4.2	TESTOPSTELLING.....	35
4.3	RESULTATEN	37
4.3.1	<i>Trekproef op de 0° samples</i>	37
4.3.2	<i>Trekproef op de 90° samples</i>	43
HOOFDSTUK 5	ONTWERP EN PRODUCTIEPROCESSEN	46
5.1	ONTWERP VAN HET FRAME.....	46
5.2	BUIZEN.....	51
5.2.1	<i>Wikkelen</i>	51
5.2.2	<i>Draperen</i>	55
5.2.3	<i>Tegenmal met binnendruk en infusie</i>	57
5.3	LUGS	61
5.4	SAMENBOUW	66
HOOFDSTUK 6	TESTEN	68
6.1	FREQUENTIE-TESTEN	68
6.1.1	<i>Reële eigenfrequenties</i>	68
6.1.2	<i>Numerieke Simulatie</i>	73
6.2	DRIEPUNTSBUIGPROEF	78
6.3	FRAMESTIJFHEID	84
HOOFDSTUK 7	BESLUIT	88
BIBLIOGRAFIE		90

Symbolen- en Afkortingenlijst

MATERIAAL EIGENSCHAPPEN

E	Elasticiteitsmodulus van Young voor een isotroop materiaal
E_{11}, E_{22}	Elasticiteitsmoduli langs de hoofrichting in het materiaal
$\epsilon_{11}, \epsilon_{11,ult}, \epsilon_{22}, \epsilon_{22,ult}$	(Maximum) rekken langs de hoofdrichtingen in het materiaal
ρ	Dichtheid
ν	Poisson coëfficiënt voor een isotroop materiaal
ν_{12}, ν_{21}	Poisson coëfficiënten in het vlak
σ_{ult}	Ultieme treksterkte van een isotroop materiaal
$\sigma_{11,ult}, \sigma_{22,ult}$	Ultieme treksterkte langs de hoofdrichtingen in het materiaal
α	Thermische uitzetting
T_{max}	Maximum bewerkingstemperatuur
G	Glijdingsmodulus
M	Moment
I_{yy}	Traagheidsmoment

ALGEMEEN

E:	Engelse vertaling
PTFE	Polytetrafluorethyleen
BMC	Bulk Modulus Compounds
SMC	Sheet Moulding Compounds
RTM	Resin Transfer Moulding
VIP	Vacuum Injection Moulding
ASTM	American Society for Testing and Materials
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
UD	UniDirectional
TPI	Threads per Inch
PUR	Polyurethaan
TEX	De massa aan vezels per lengte-eenheid

Figurenlijst

Figuur 2.1: Opnames van a) een glasvezel, b) een aramidevezel en c) een koolstofvezel met behulp van een elektronen-microscoop [4]	7
Figuur 2.2: Laminaat, 3 lagen	9
Figuur 2.3: Korte, verhakke glasvezels in een mat	10
Figuur 2.4: Unidirectionele koolstofvezels samengehouden door fijne draadjes	11
Figuur 2.5: Glasvezelweefsel	11
Figuur 2.6: Strand.....	14
Figuur 2.7: Yarn	14
Figuur 2.8: Roving van koolstofvezels	15
Figuur 2.9: Hand lay-up en Spray lay-up [5]	16
Figuur 2.10: Persgieten [6].....	16
Figuur 2.11: Harsinjectie [7]	17
Figuur 2.12: Vacuum bag [8]	18
Figuur 2.13: Autoclaaf zonder druktoevoer [9]	18
Figuur 2.14: Pultrusie [10]	19
Figuur 2.15: Schematische voorstelling wikkelpoces [11]	20
Figuur 2.16: Spuitgieten [12]	20
Figuur 3.1: Raceauto met verschillende binnen- en buitenpanelen van natuurlijke vezels en biohars, winnaar van de Composites Europe Pioneer Award 2009 (Four Motors GmbH) [13]	22
Figuur 3.2: 4 verschillende vlasvezel bundeltypes: (van links naar rechts) non-woven vlas, doubled vlas, roving en yarn [15].....	24
Figuur 3.3: Schematische weergave van de structuur van vlas [14]	25
Figuur 3.4: Dwarsdoorsnede van een gebroken vlasvezelbundel [14].....	26
Figuur 3.5: Oppervlak van een vlasvezel waarbij de buitenste celwand verwijderd is [14]....	26
Figuur 3.6: Evolutie van de fiets [17]	30
Figuur 3.7: Mal met koolstof prepreg	31
Figuur 4.1: De VIP-opstelling.....	34
Figuur 4.2: Resintrap.....	34

Figuur 4.3: 8 testsampels uit een vlasvezelplaat	35
Figuur 4.4: Trekbank: Instron 5800r	36
Figuur 4.5: De extensometer	36
Figuur 4.6: 0° - Vlasvezel met sizing	37
Figuur 4.7: 0° - Onbehandelde vlasvezel	37
Figuur 4.8: Opgemeten rekken van de 0°-richting onbehandeld UD-vlasvezel	40
Figuur 4.9: Opgemeten Rekken van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing	40
Figuur 4.10: Uitgerekende Poisson Coëfficiënt van de 0°-richting onbehandeld UD-vlasvezel	41
Figuur 4.11: Uitgerekende Poisson Coëfficiënt van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing.	41
Figuur 4.12: Trek-Rek Curve van de 0°-richting onbehandelde UD-vlasvezel	42
Figuur 4.13: Trek-Rek Curve van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing	42
Figuur 4.14: 90° - Vlasvezel met sizing	43
Figuur 4.15: 90° - Onbehandelde vlasvezel	43
Figuur 4.16: Trek-Rek Curve van de 90°-richting onbehandelde UD-vlasvezel	45
Figuur 4.17: Trek-Rek Curve van de 90°-richting UD-vlasvezel met sizing	45
Figuur 5.1: Z-frame [22]	47
Figuur 5.2: Framematen [18]	48
Figuur 5.3: Headset Orbit Z van FSA [23]	49
Figuur 5.4: Bottom Bracket Shell [24]	50
Figuur 5.5: Het frame, met achtervork	50
Figuur 5.6: Het frame, zonder achtervork	51
Figuur 5.7: De wikkelopstelling [26]	52
Figuur 5.8: Het harsbad	52
Figuur 5.9: Weerstandswielen [26]	53
Figuur 5.10: Wikkelformen: kruisend, polair en radiaal	53
Figuur 5.11: Detail wikkeling getorde vezel, yarn	54
Figuur 5.12: Detail droog wikkelen	55
Figuur 5.13: Resultaat infusie na droog wikkelen	55
Figuur 5.14: Cilindrische binnenmal uit polyurethaan	56
Figuur 5.15: Vacuüm infusieproces	56
Figuur 5.16: Schematische voorstelling rimpelcreatie bij vacuümproces	57

Figuur 5.17: Aluminium buitenmal met blaasbalg en infusie	58
Figuur 5.18: Goed resultaat uit de aluminium mal	58
Figuur 5.19: Glasvezelmal met pvc-afdruk	59
Figuur 5.20: Glasvezelmal met polyester (blauw) afwerking	59
Figuur 5.21: Gedrapeerde binnenband in mal	60
Figuur 5.22: Infusieproces buizen in glasvezelmal	60
Figuur 5.23: Gelijkde buizen	62
Figuur 5.24: Volledig gelijkde buizen	62
Figuur 5.25: Verbinding door prepreg matten	62
Figuur 5.26: Mal van de lug ingesmeerd met latex	63
Figuur 5.27: Gedrapeerde mal van een lug	64
Figuur 5.28: Gedrapeerde lug in vacuümzak	65
Figuur 5.29: Resultaat gedrapeerde lug	65
Figuur 5.30: Buizen en lugs voor samenbouw	66
Figuur 5.31: Afgewerkt frame, zonder achtervork	67
Figuur 6.1: Testopstelling frequentiemeting	69
Figuur 6.2: Hamer frequentietest	69
Figuur 6.3: Eigenmodes vlasvezelbuis	70
Figuur 6.4: Eigenmodes glasvezelbuis	71
Figuur 6.5: Eigenmode carbonvezelbuis	71
Figuur 6.6: Energie dichtheid van de hamer op de buis	72
Figuur 6.7: Frequentieresponsie na impact op de carbonbuis	72
Figuur 6.8: Schematische voorstelling van de stijfheidseigenschappen voor een orthotroop materiaal [25]	73
Figuur 6.9: Transversale isotropie in een unidirectioneel vezelversterkt composiet [25]	74
Figuur 6.10: Euclidisch- en cilindrisch assenstelsel	75
Figuur 6.11: 1ste mode: 546 Hz	76
Figuur 6.12: 1ste mode: 550 Hz	76
Figuur 6.13: 2de mode: 1338 Hz	77
Figuur 6.14: 2de mode: 1346 Hz	77
Figuur 6.15: 3de mode: 2285 Hz	77
Figuur 6.16: 3de mode: 2298 Hz	78

Figuur 6.17: Schematische voorstelling driepuntsbuigproef.....	79
Figuur 6.18: Opstelling driepuntsbuigproef	79
Figuur 6.19: Trek-rek curves van de driepuntsbuigproeven, tot 4 % rek.....	81
Figuur 6.20: Trek-rek curves van de driepuntsbuigproeven, tot 0.15 % rek.....	82
Figuur 6.21: Glasvezelbuis onder belasting	83
Figuur 6.22: Carbonbuis onder belasting	83
Figuur 6.23: Vlasvezelbuis onder belasting	83
Figuur 6.24: Testopstelling framestijfheid	84
Figuur 6.25: Lvdt's en krachtsensor (onderaan de foto)	84
Figuur 6.26: As voor framebevestiging in- en uit het frame	85
Figuur 6.27: Aangelegde kracht in functie van de tijd	85
Figuur 6.28: Kracht-verplaatsingscurve frame.....	86
Figuur 6.29: Hoekverdraaiing-kracht curve	87

Tabellenlijst

Tabel 2.1 De functies van de samenstellende componenten van vezelversterkte kunststoffen [2]	4
Tabel 2.2: Eigenschappen van ingenieursmaterialen, vezels en matrixmaterialen [3]	6
Tabel 2.3: Richtwaarden voor enkele eigenschappen van een aantal kunststoffen [2]	8
Tabel 2.4: Voornaamste voor- en nadelen van vezelversterkte kunststoffen	12
Tabel 3.1: Indicatie van prijzen in 2011 van enkele natuurlijke vezels en glasvezel [14]	24
Tabel 3.2: Relatieve prijzen van natuurlijke vezels ten opzichte van glasvezel (€/€) [14]	24
Tabel 3.3: Eigenschappen van enkele natuurlijke vezels [14]	27
Tabel 3.4: Eigenschappen van droge uitvoeringsvormen van vlas met hun verwerkingssterkte [15]	28
Tabel 3.5: Eigenschappen van uitvoeringsvormen van vlas tot composiet verwerkt (allen op dezelfde wijze) [15]	28
Tabel 3.6: Voor- en nadelen van natuurlijke vezels t.o.v. glasvezels	28
Tabel 4.1: Treksterkte eigenschappen van de 0°-richting onbehandeld UD-vlasvezel	39
Tabel 4.2: Treksterkte eigenschappen van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing	39
Tabel 4.3: Treksterkte eigenschappen van 0°-richting prepreg UD-vlasvezel [3]	39
Tabel 4.4: Treksterkte eigenschappen van de 90°-richting onbehandeld UD-vlasvezel	44
Tabel 4.5: Treksterkte eigenschappen van de 90°-richting UD-vlasvezel met sizing	44
Tabel 4.6: Treksterkte eigenschappen van 0°-richting prepreg UD-vlasvezel [3]	44
Tabel 5.1: Framematen [18]	48
Tabel 5.2: Afmetingen frame-onderdelen	49
Tabel 6.1: Gesimuleerde eigenfrequenties	76
Tabel 6.2: Dikte van de geteste buizen	80
Tabel 6.3: Stijfheden onder buiging	82

Hoofdstuk 1

Inleiding

Composietmaterialen hebben een belangrijke plaats ingenomen in de technologie van de moderne materialen en worden reeds veelvuldig gebruikt in allerlei toepassingen, gaande van lichtgewicht onderdelen voor de transportsector tot grote turbinebladen van windmolens.

De vezelversterkte kunststoffen winnen aan populariteit (ondanks de hoge productiekosten) in high-performance producten die licht, maar tevens sterk genoeg moeten zijn om te gedijen onder zware omstandigheden. Voorbeelden hiervan zijn ruimtevaarttoepassingen, jachten, autoracing, fietsframes, ...

Ondanks de uitstekende materiaalkarakteristieken en de brede inzetbaarheid van vezelversterkte kunststoffen zijn er een aantal nadelen. De kostprijs (productiekost) blijft relatief hoog t.o.v. de meer gevestigde materialen, zoals metalen, en recyclage is een groot pijnpunt van de technologie. Met deze masterproef wordt geprobeerd een racefiets te ontwerpen en te produceren bestaande uit milieuvriendelijke en regenererbare componenten: vlas als vezel en biohars als bindende kunststof.

De keuze voor deze componenten en het uitschrijven van deze masterproef vloeit voort uit een aantal aspecten:

1. Vlas is een biologisch regenererbaar product.
2. Vlas is een product uit onze contreien, meer bepaald Noord-Frankrijk en Vlaanderen.
3. De recente ontwikkeling van biohars, met evenwaardige eigenschappen als conventionele epoxyharsen.
4. Het niet toxisch karakter van het biohars. De (epoxy)harsen die gewoonlijk gebruikt worden zijn toxisch. Bij de verwerking van de harsen dienen telkens verscheidene voorzorgsmaatregelen genomen te worden, zoals een goed geventileerde ruimte, mondkapje en handschoenen. Met biohars is dit euvel opgelost.
5. De Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen beschikte reeds over de nodige kennis en apparatuur voor het produceren van een racefiets.
6. Uit de samenwerking met MuseeuwBikes[1] in het verleden is er meer kennis ontstaan omtrent het werken met vlas.

Het voornaamste doel van de masterproef is het bekijken van de mogelijkheid tot het produceren van een fietsframe en de uiteindelijke uitvoering ervan. Verder wordt het frame en het gebruikte materiaal gekarakteriseerd en vergeleken met andere materialen d.m.v. een frequentietest en een driepuntsbuigproef.

In volgende hoofdstukken zal de lezer wat meer bij worden gebracht rond composiet materialen. Het volledige proces, vanaf hoe het frame tot stand kwam, zal worden voorgesteld in chronologische volgorde. Ook enkele numerieke berekeningen worden niet aan de lezer onthouden. Met tot slot het besluit van de thesis.

Hoofdstuk 2

Inleiding tot composietmaterialen

Het fietsframe zal vervaardigd worden uit vlas en biohars. Deze combinatie is een vezelversterkte kunststof. Het concept composieten wordt uitgelegd door middel van een definitie, waarbij de nadruk zal liggen op de vezelversterkte kunststoffen. Er volgt een opsomming van verschillende soorten vezels samen met een bespreking van hun karakteristieken. Tot slot worden enkele toepassingen en productiemethoden aangehaald.

2.1 Composieten – Definitie

Composietmaterialen zijn materialen die bestaan uit twee of meer duidelijk te onderscheiden fasen met verschillende fysieke of chemische eigenschappen. Wanneer deze gecombineerd zijn, wordt een materiaal met andere eigenschappen dan de samenstellende materialen bekomen. De individuele componenten blijven gescheiden in de eindconfiguratie. In wezen zijn composieten heterogene materialen. Op deze manier krijgt men materialen met een hogere stijfheid, een hogere trek- of druksterkte, materialen die goedkoper of lichter zijn, ...

Er zijn veel natuurlijke composieten zoals beenderen en tanden, hout en bamboe. Maar onze interesse gaat uit naar de technische composieten, die kunstmatig worden vervaardigd. De eerste handgemaakte composieten dateren van 6000 jaar geleden, waarbij klei en stro werden gebruikt om bakstenen te maken. De typische ingenieurstoepassingen van composieten omvatten:

- Composiet bouwmaterialen zoals cement en beton
- Metaal composieten
- Keramische composieten
- Versterkte kunststoffen zoals vezelversterkte kunststoffen

Composietmaterialen worden doorgaans gebruikt voor gebouwen, bruggen en structuren zoals scheepsrompen, buitenbekleding van racewagens, douchecabines, badkuipen, opslagtanks, ... De meest geavanceerde voorbeelden komen voort uit de lucht- en ruimtevaartindustrie en andere veeleisende omgevingen.

Omdat we bij de bouw van het fietsframe uitsluitend geïnteresseerd zijn in de vezelversterkte kunststoffen, beperken we ons enkel tot deze groep. Vezels bezitten de beste vorm voor versterkingsdoeleinden; het resulterende materiaal krijgt in de richting van de vezels zeer hoge mechanische eigenschappen, sterkte en stijfheid, in verhouding tot de soortelijke massa. Het bekomen materiaal wordt daardoor anisotroop (soms zeer sterk anisotroop), i.e. zeer verschillende mechanische eigenschappen in verscheidene richtingen van het materiaal.

Vezelversterkte kunststoffen bestaan uit versterkende vezels, ingebed in een bindmiddel, (meestal de matrix genoemd) en ervan gescheiden door een grensoppervlak. Het grensoppervlak kan fysisch al dan niet verwezenlijkt zijn door een nabehandeling van, of een deklaag (E: sizing) op de vezels. De vezels zijn nog altijd de belangrijkste sterktegevende componenten, maar de matrix en het grensoppervlak zijn noodzakelijk. Ze verzekeren dat de vezels op een behoorlijke manier hun rol kunnen vervullen.

De belangrijkste functies van de samenstellende componenten van een vezelversterkte kunststof worden in Tabel 2.1 samengevat:

Tabel 2.1 De functies van de samenstellende componenten van vezelversterkte kunststoffen [2]

VERSTERKINGSVEZELS
De voornaamste belastingdragende component
Bepalen de stijfheid
Beperken de scheurgroei in de matrix
MATRIX
Houdt de vezels samen en houdt ze op de gewenste plaats
Beschermt de vezels voor de omgeving
Vermindert de scheurvorming (breuk) van de vezels
Draagt de kracht over op de vezels
GRENSOPPERVLAK (DEKLAAG)
Bevordert de bevochtiging van de vezel
Verzekert de binding van de vezel en de matrix
Beschermt de vezel bij verwerking
Voorkomt direct vezel-vezel contact
Bepaalt mede de overdracht van de belasting tussen de vezel en de matrix

De vezels in een vezelversterkte kunststof worden, zoals de naam zelf zegt, ingebracht in een polymeer-matrix, veelal een hars (E: resin) genoemd. In wat volgt worden enkele vezels en matrices besproken.

2.1.1 Vezels

Er worden twee types vezels gebruikt in composietmaterialen, waarbij het eerste type nog de grote overhand heeft in de industrie:

1. Synthetische vezels worden geproduceerd voor een hoge specifieke sterkte (i.e. de sterkte gedeeld door het gewicht) en een hoge specifieke stijfheid (i.e. de stijfheid gedeeld door het gewicht). Deze vezels zijn kunstmatig aangemaakt en elke vezel heeft dezelfde eigenschappen.
2. Natuurlijke vezels, zoals vlas, hennep, jute en bamboe vertonen onderling niet dezelfde eigenschappen als gevolg van hun natuurlijke opbouw. Door hun gedrag en hun eigenschappen, die nooit precies te voorspellen zijn, worden deze vezels meestal niet gekozen voor mechanisch belaste constructies.

2.1.1.1 Glasvezels

Het overgrote deel van alle vezelversterkte kunststoffen bestaan uit glasvezel, en dit omwille van de relatief lage prijs en behoorlijke sterkte. Glasvezel ontspruit uit het proces waarbij gesmolten glas in een oven op 1050 tot 1400 °C wordt gebracht. In de bodem van de oven bevinden zich duizenden gaatjes, waardoor het gesmolten glas omwille van de zwaartekracht stroomt. Tijdens het afkoelen wordt het glas heel snel getrokken tot fijne filamenten met een diameter van 3 tot 20 µm. Nadien worden de vezels via een nevel voorzien van een sizing.

Naargelang de samenstelling van het gesmolten glas, bekomt men een ander type vezel, met andere eigenschappen. Het meest gebruikte type is het E-type. Het vertoont behoorlijke eigenschappen voor een redelijke prijs. Zo is er ook nog het S- en R-glas met een hogere sterkte en stijfheid.

Glasvezel wordt niet alleen gebruikt als continue vezel (kan tot een lengte van 12 km gaan), vaak worden glasvezels nog als vrij korte vezels verwerkt (E: chopped fibers). Vanuit het oogpunt van sterkte en stijfheid, is dit een niet zo aantrekkelijke vorm doordat de vezels onderbroken zijn.

2.1.1.2 Organische vezels

Organische vezels zijn ook wijdverspreid, maar zijn meer bekend onder de naam Kevlar- en Twaron vezels. Polyaramidevezels, kortweg aramidevezels, zijn opgebouwd uit lange kettingen aromatische ringen, die tijdens een spinproces worden getrokken. Er ontstaat hierdoor een voorkeursrichting waardoor in de langsrichting heel goede eigenschappen krijgen.

De belangrijkste eigenschappen van aramidevezels zijn hun hoge stijfheid en sterkte bij een lage soortelijke massa, hun grote buigzaamheid en taaiheid waardoor ze gemakkelijker te verwerken zijn dan glasvezels en koolstofvezels. Hierdoor hebben ze ook een goede reputatie in toepassingen met grote stootbelastingen. Nadelen van dit materiaal zijn de geringe druksterkte en de grote gevoeligheid voor vocht en UV-licht.

Tabel 2.2: Eigenschappen van ingenieursmaterialen, vezels en matrixmaterialen [3]

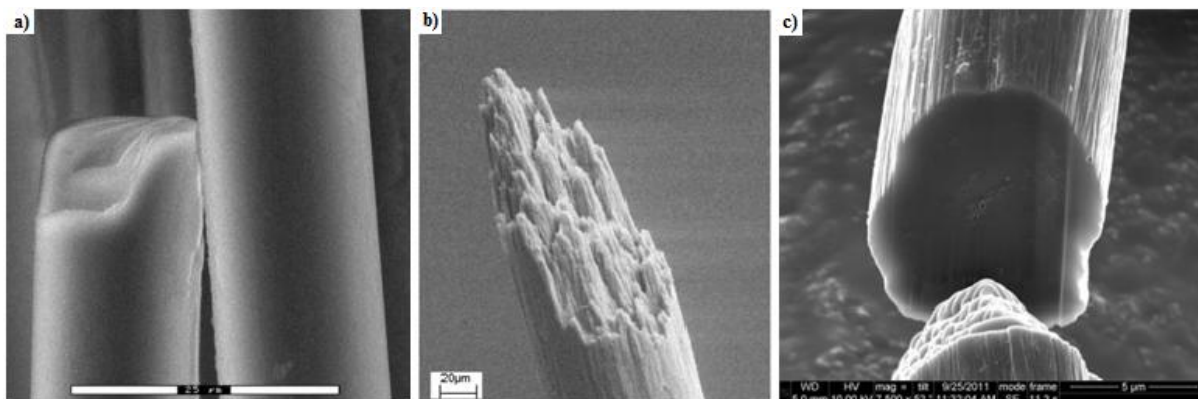
Materiaal	Densiteit $\rho, \left[\frac{g}{cm^3}\right]$	Modulus van Young E, [GPa]	Poisson ratio $\nu, [-]$	Treksterkte $\sigma_{ult}, [MPa]$	Specifieke stijfheid $\frac{(E/\rho)}{(E/\rho)_{Al}}, [-]$	Specifieke sterkte $\frac{(\sigma_{ult}/\rho)}{(\sigma_{ult}/\rho)_{Al}}, [-]$
METALEN						
Staal	7.8	200	0.32	1724	1.0	1.2
Aluminium	2.7	69	0.33	483	1.0	1.0
Titanium	4.5	91	0.36	758	0.95	1.2
VEZELS (axiale eigenschappen)^a						
AS4	1.8	235	0.2	3599	5.1	11.1
T300	1.76	231	0.2	3654	5.1	11.5
P100S	2.15	724	0.2	2199	13.2	5.5
IM8	1.8	310	0.2	5171	6.7	16.1
Kevlar 49	1.44	124	0.34	3620	3.6	13.9
S-2 Glass	2.46	86.8	0.23	4585	1.4	10.4
E-Glass	2.58	69	0.22	3450	1.05	7.5

^aDe eerste vier soorten vezels zijn koolstofvezels

2.1.1.3 Koolstofvezels (E: Carbon Fibers)

De meest geavanceerde en gebruikte vezel in de fietsindustrie is de koolstofvezel. Koolstofvezels worden verkregen door alle niet-koolstofelementen door carbonisatie (verkoling) te verwijderen uit een organische startvezel, de precursor genoemd. Dit gebeurt door pyrolyse (chemische decompositie) bij temperaturen tot 3000 °C. Als precursor wordt vooral polyacrylnitrile (PAN) gebruikt, maar steeds meer filamenten worden op basis van pek gemaakt.

Afhankelijk van het productieproces, verschillen de eigenschappen van de soorten koolstofvezels sterk, zie Tabel 2.2. Om nadien bij verwerking tot een composiet een goede hechting van de koolstofvezel aan de matrix te bereiken, wordt ook hier een nabehandeling toegepast. De beste nabehandeling is een lichte oxidatie van het oppervlak waardoor de hechting 2- tot 3-maal verbetert.



Figuur 2.1: Opnames van a) een glasvezel, b) een aramidevezel en c) een koolstofvezel met behulp van een elektronen-microscop [4]

2.1.2 Matrices

De meest voorkomende matrices zijn zonder twijfel de polymeren. Het gebruik van polymeren is aangewezen door hun lage soortelijke massa, hun goede chemische en diëlektrische eigenschappen en hun eenvoudige verwerking. Polymeren worden, op basis van hun gedrag onder invloed van warmte, ingedeeld in thermoharders en thermoplasten.

Thermoplasten, zoals Nylon en Polypropyleen, worden zacht tijdens opwarming. Deze materialen kunnen vervormd en gerecycleerd worden wanneer ze verwarmd of gesmolten worden. Het proces van recyclen is niet eindeloos. De materiaaleigenschappen nemen af naargelang het aantal keer de thermoplast herbruikt wordt.

Thermoharders krijgen tijdens de productie een sterke, ruimtelijk vernette structuur. Deze polymeren blijven hard tijdens opwarming. Ze kunnen bijgevolg ook niet vervormd en gerecycleerd worden. Bij de vernetting (E: cross-linking) gaat men uit van rechtlijnige polymeerketens, die na reactie met een ander geschikt product, meestal de verharders of cross-link agents genoemd, een ruimtelijke vernette structuur opleveren. Dit proces wordt ook wel uitharden genoemd. De uithardingsreactie kan in stand gehouden en versneld worden door katalysatoren en acceleratoren. Soms volstaat een verhoging van temperatuur (bijvoorbeeld door een oven) als katalysator. Afhankelijk van het fabricage-proces en de vereiste kwaliteit van het eindproduct, heeft het uithardingsproces een duurtijd, gaande van enkele minuten tot vele uren.

De belangrijkste thermoharders zijn ongetwijfeld de polyesters (relatief goedkoop, vele toepassingen mogelijk) en de epoxy's (beter dan de polyesters, maar ook duurder).

Tabel 2.3: Richtwaarden voor enkele eigenschappen van een aantal kunststoffen [2]

		THERMOHARDER		THERMOPLAST	
		Epoxy	Polyester	Nylon	Polypropyleen
ρ	(kg/m^3)	1100-1400	1200-1500	1140	900
E	(GPa)	3 – 6	2 – 2.4	1.4 – 2.8	1 – 1.4
σ_{ult}	(MPa)	35 – 100	40 – 90	60 – 75	25 – 38
ε_{ult}	(%)	1 – 6	2	40 – 80	>300
α	($10^{-6}/K$)	50 – 60	100 – 200	90	110
$krimp$	(%)	1 – 4	4 – 8		
T_{max}	($^{\circ}C$)	50 – 300	50 – 110	75	60 - 65

Thermoharders waren lange tijd de belangrijkste matrices in vele composieten. Door de goede werkbaarheid bij lage temperaturen, hun lage viscositeit en goede bevochtiging (de mate waarin de vezels geïmpregneerd worden door de matrix) van de versterkingsvezels, is het relatief gemakkelijk en goedkoop om met deze matrices te werken. Tot op heden blijven de thermoharders nog steeds de voornaamste matrix voor composieten met lange vezels (voornamelijk hoogwaardige toepassingen).

Thermoharders hebben ook enkele nadelen. Ze zijn onderworpen aan sterke krimp bij uitharding, zie Tabel 2.3. Eveneens heeft men te maken met bellenvorming (E: voids) tijdens het uithardingsproces. De bellen ontstaan door de vorming van waterdamp, maar ook door het vrijkomen van solventen of verdunners bij de cross-linking. De luchtbellens kunnen op de mechanische eigenschappen een negatieve invloed hebben, die zeker niet gewenst is bij producten die aan strenge veiligheidsvoorschriften moeten voldoen. Het vrijkomen van dampen van giftige vluchtige stoffen heeft als gevolg dat er tijdens de productie steeds een goede afzuiging en ventilatie moet plaatsvinden in de werkruimtes. Een belangrijk probleem is bijvoorbeeld het vrijkomen van styreen, die als verharder voor de uitharding van polyesters wordt gebruikt.

Thermoplasten hebben ten opzichte van de thermoharders enkele belangrijke potentiële voordelen of pluspunten:

- Het verwerkingsproces is omkeerbaar door verwarmen. Hierdoor kan het productieritme opgedreven worden tot een factor 10 ten opzichte van de thermoharders.
- Recyclage is mogelijk.
- Er vinden geen chemische reacties plaats, waardoor er ook geen vluchtige, giftige stoffen kunnen vrijkomen.

- Er is weinig of geen krimp.
- Het is mogelijk om onderdelen uit thermoplasten aan elkaar te lassen door overeenkomstige delen te verwarmen en tegen elkaar te zetten. Reparaties kunnen zo eenvoudig uitgevoerd worden.
- Grotere taaiheid bij breuk, betere weerstand bij stootbelasting.

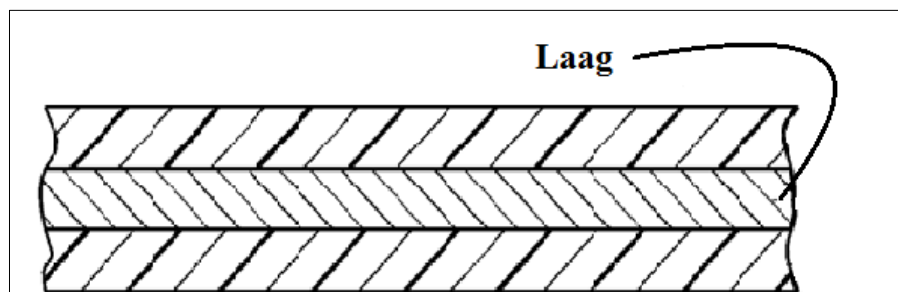
Vezelversterkte thermoplasten kennen ook een sterkere jaarlijkse groei van 30%, en dit tegenover 5 tot 8% groei bij thermoharders.

De keerzijde van de medaille is het feit dat het verwerken van lange vezels met thermoplasten nog steeds geen sinecure is. In vloeibare toestand is de thermoplast zeer visceus, waardoor het bevochtigen van de vezels bemoeilijkt wordt. Ook blijkt de recyclage van thermoplasten in composieten niet van een leien dakje te lopen. Het proces gaat gepaard met verliezen in zowel hoeveelheid als in eigenschappen van het materiaal.

2.2 Voorkomen en toepassingen van vezelversterkte kunststoffen

2.2.1 Algemeen voorkomen

Kleine vezelversterkte kunststofcomponenten zijn meestal massief uitgevoerd. Grotere constructies en constructie-elementen bestaande uit vezelversterkte kunststof, zijn grotendeels samengesteld uit laminaten of profielen. Een laminaat is een dunne plaat die opgebouwd is uit één of meerdere lagen (E: layers), zie Figuur 2.2, waarin de vezels volgens een welbepaald patroon zijn ingebracht. Hierdoor krijgt het materiaal de gewenste sterkte-eigenschappen in de richtingen waarvoor het doel zich rechtvaardigt.



Figuur 2.2: Laminaat, 3 lagen

Tijdens de productie van een laminaat worden de lagen, volgens een vooraf bepaalde stapelvolgorde (E: stacking sequence), op elkaar aangebracht. De lagen vertonen een aantal soorten vezelpatronen:

- Korte vezels, zie Figuur 2.3: Deze vezels kunnen gebruikt worden in massieve componenten alsook in matten. Een mat is een dunne laag waarin de vezels in het vlak van de laag liggen. Men tracht een gelijkmatige verdeling te bekomen (isotrope verdeling van de vezels in de mat).
- Unidirectionele vezels, ook wel UD-vezels genoemd, zie Figuur 2.4: Dit zijn continue vezels, die allen in dezelfde richting liggen.
- Verschillende textiel-structuren zoals weefsel, vlecht, breisel of een wikkelpatroon. In Figuur 2.5 is een voorbeeld van een glasvezelweefsel gegeven.



Figuur 2.3: Korte, verhakke glasvezels in een mat



Figuur 2.4: Unidirectionele koolstofvezels samengehouden door fijne draadjes



Figuur 2.5: Glasvezelweefsel

Een nadeel van de opbouw van een laminaat, is de lage sterkte in dwarsrichting. Aangezien het laminaat is opgebouwd uit lagen, zijn er geen vezels die de lagen verbinden. Deze onvolmaaktheid kan zorgen voor delaminaties van het materiaal. Dit zijn zones waar de lagen door een uitwendige belasting of beschadiging van elkaar loskomen. Hierdoor verliest het materiaal aan sterkte en kan dit leiden tot het uiteindelijk volledig falen van het materiaal. Dit kan opgelost worden door gebruik te maken van 3D-textiel-structuren zoals 3D-weefsel. Hierin zijn de weefsels in alle richtingen onderling aan elkaar verbonden. Dit proces staat echter nog in zijn kinderschoenen.

2.2.2 Toepassingen

De redenen waarom vezelversterkte kunststoffen voor een welbepaalde toepassing worden gebruikt, kunnen van diverse aard zijn. De voordelen van het nieuwe materiaal moeten opwegen tegen de nadelen ervan. Het belangrijkste criterium is de kostprijs. De mogelijke meerprijs van het product moet tijdens de levensloop gecompenseerd worden door winsten ten opzichte van de meer conventionele materialen.

Andere criteria zijn bijvoorbeeld een verhoogde positioneer-nauwkeurigheid van een robot, een verhoogde snelheid van snelbewegende machines of betere prestaties, zoals bij sportartikelen, waarbij de consument bereid is om hogere bedragen neer te tellen.

in Tabel 2.4 worden de belangrijkste voor- en nadelen van vezelversterkte kunststoffen op een rij gezet.

Tabel 2.4: Voornaamste voor- en nadelen van vezelversterkte kunststoffen

VOORDELEN
• Hoge verhouding van sterkte en stijfheid tot de soortelijke massa • Optimale vormgeving is gemakkelijker te bereiken dan bij het gebruik van metalen • Het optimaliseren naar de vereiste eigenschappen voor de welbepaalde omstandigheden is in verregaande mate mogelijk • Diverse voordelen zoals al dan niet elektrisch geleidend, thermisch isolerend, ...
NADELEN
• Kostprijs van zowel basismateriaal als productie • Productiemethoden zijn dikwijls zeer arbeidsintensief en traag • Lage breukrek: er is bijna geen plastische vervorming mogelijk • Beperkte recycleerbaarheid en hergebruikbaarheid
BEPERKINGEN EN PROBLEMEN
• De werkwijze voor de omgang met vezelversterkte kunststoffen verschilt in grote mate met metalen. Ze vergen omschakeling van personeel, gespecialiseerde kennis, nieuwe machines, ... • Er bestaat een terughoudendheid ten opzichte van nieuwe materialen in vele markten • Er dient nog veel onderzoek geleverd te worden op het vlak van materiaaleigenschappen, snellere en betere productietechnieken en goedkopere ontwerpmethodes

Het gebruik van composieten is wijdverspreid en de verschillende applicaties zijn ontelbaar. In wat volgt worden een aantal voorbeelden gegeven:

- Componenten in vliegtuigen, zoals elementen van het landingsgestel, deuren, flaps en roervlakken, ... Deze componenten dienen om het gewicht tot een minimum te herleiden en het brandstofverbruik aanzienlijk te verminderen.
- Sportartikelen zoals tennisrackets, ski's, fietskaders, wedstrijdboten, ...
- Auto-onderdelen zoals het koetswerk, spoilers en bumpers, wielvelgen, ...
- In de energiesector, zoals in masten en wieken van windmolens.
- In de scheepsbouw zoals plezierboten en jachten
- ...

2.3 Productiemethodes

Vezelversterkte kunststoffen zijn samengesteld uit een hars (de matrix), vezels en eventueel vulstoffen. Deze materialen moeten op een gepaste manier worden samengebracht. Ze worden meestal onderworpen aan een temperatuur- en drukcyclus, teneinde een vaste vorm aan te nemen. De fabricagemethode hangt af van de eisen die worden gesteld aan het eindproduct. Belangrijke factoren hierin zijn:

- De complexiteit en de grootte van het werkstuk
- Omvang van de serie
- Vereiste kwaliteit en eigenschappen: toelating tot porositeiten, het vezelvolumegehalte (i.e. de verhouding van het volume aan vezels op het totale volume dat het stuk inneemt), de vezeloriëntatie
- Het hars moet de gepaste “pot-life” bezitten, i.e. de tijd vooraleer verharding optreedt
- Economische overwegingen

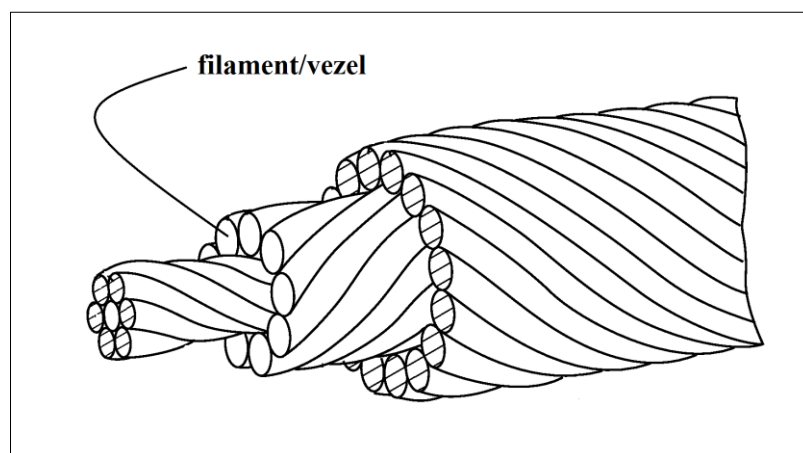
Alle hierna beschreven methodes maken gebruik van een mal. Dit kan zowel een open als een gesloten mal zijn. Bij iedere mal worden lossingmiddelen gebruikt: een Polytetrafluorethyleen (PTFE) lossingmiddel (E: release agent) kan hiervoor gebruikt worden.

Na een eventuele warmtebehandeling in het proces, kan het product nog nagehard worden (E: post-curing). Deze nabehandeling verhoogt de polymerisatiegraad van het hars en verbetert de materiaaleigenschappen.

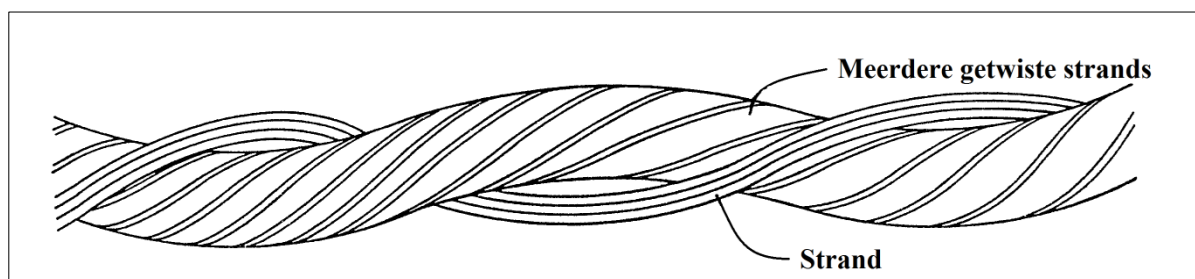
2.3.1 Grondstoffen

Zoals besproken in 2.2.1 kunnen allerlei soorten vezelmatten bekomen worden op de markt. Uiteraard zijn vezels ook in andere vormen beschikbaar. Vezelfabrikanten leveren vezels in de vorm van bundels of als garens, met enkele honderden tot meer dan honderdduizenden filamenten. Door hun kleine diameter kunnen vezels sterk bewerkt worden zonder hen te beschadigen. Zo worden ze verwerkt tot :

- Een strand, tow of end (Figuur 2.6): dit is een niet getwiste bundel van filamenten of vezels. Alle vezels in een strand worden gelijktijdig gemaakt en tezamen gesponnen.
- Yarns (Figuur 2.7): worden gevormd door het twisten en vervolgens plooien van strands. Twee of meer strands worden rond elkaar getwist. Het twisten zorgt voor meer treksterkte van de yarns in de vezelrichting door wrijvingskrachten. De diameter, sterkte en flexibiliteit van de yarn wijzigen. Een yarn vormt een belangrijke stap in het produceren van de verschillende weefsels. Deze vezelstructuur heeft een touwachtig uitzicht.
- Rovings (Figuur 2.8): bestaan uit een groep van 12 tot 120 parallelle strands die samen op een bobijn zijn gewonden. De dikte van de roving wordt aangegeven door de eenheid TEX (g/km). TEX stelt de massa aan vezels per lengte-eenheid voor.
- Chopped rovings of strands: zijn continue rovings of strands die in kleine lengtes van 3 tot 50 mm lengte gehakt worden. Deze vezels vinden hun weg in tal van fabricageprocessen.



Figuur 2.6: Strand



Figuur 2.7: Yarn



Figuur 2.8: Roving van koolstofvezels

Bovenstaande vezelstructuren kunnen vervolgens verwerkt worden tot weefsels, breisels, matten, kousen, ...

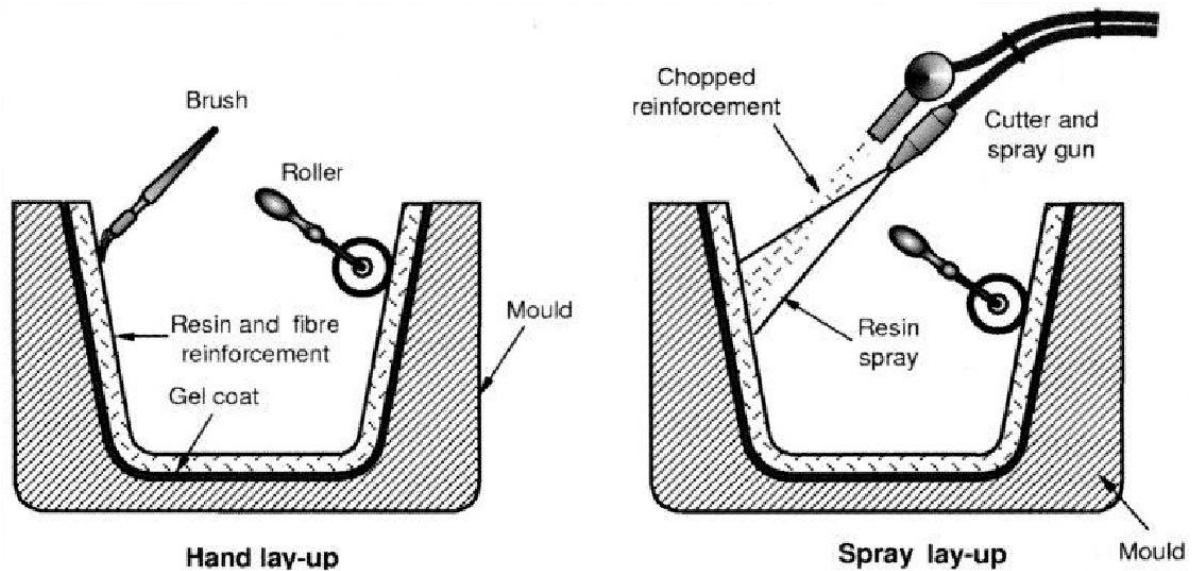
Voor serieproductie worden vooral granulaten en moulding compounds aangewend. Granulaten zijn korrels van thermoplastische matrix, waarin vooraf chopped rovings of strands worden aangebracht. Ze worden veel ingezet bij het gebruik van spuitgietinstallaties. Moulding compounds zijn voormengsels van een onverhard hars (een thermoharder) en korte vezels tot een “pasta” (bulk moulding compounds, BMC), of voormengsels van een hars en korte of lange vezels tot een “vel” (sheet moulding compounds, SMC). Een afgewogen hoeveelheid van het voormengsel, wordt in een verwarmde matrijs van een pers geplaatst, waarin het uithardt.

Veeleisende toepassingen maken voornamelijk gebruik van “prepregs”. Dit zijn laminaten waarbij de vezels of weefsels reeds van de nodige hoeveelheid hars voorzien zijn. Bij thermohardende prepregs is het hars reeds gedeeltelijk uitgehard. Dit komt de werkbaarheid ten goede. De kwaliteit van prepreg ligt vele malen hoger dan SMC: de afmetingen van de prepreg en de oriëntatie van de vezels zijn zeer nauwkeurig en de eigenschappen zijn praktisch constant. De bewaring van prepregs geschiedt bij lage temperaturen, bijvoorbeeld -18°C , omdat er geen verdere uitharding zou plaatsvinden.

2.3.2 Wet hand lay-up

Dit is de oudste en eenvoudigste methode om vezelversterkte kunststoffen te produceren. De vezels worden onder de vorm van matten, UD-vezels of weefsel aangebracht in een mal. Het hars wordt met behulp van een borstel of rol gelijkmatig aangebracht, waarna het geheel uithardt aan de lucht. Het hars is meestal een polyester op een epoxy, omdat deze kunnen uitharden bij kamertemperatuur. Er dient bij dit proces met grote zorg omgesprongen te worden met het vluchtige monomeer styreen, dat mogelijks kankerverwekkend is.

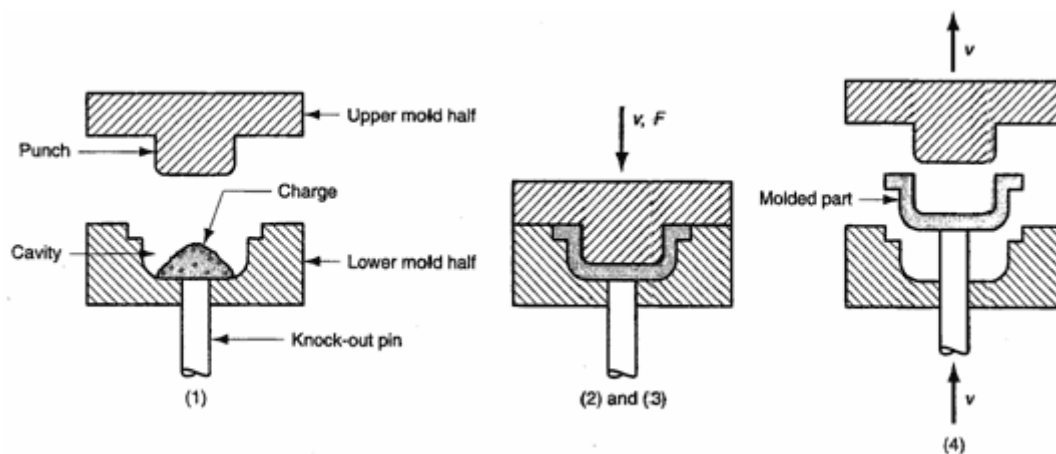
Een variant op het handlamineren is het opspuitprocédé (E: Spray-up). Rovings worden verwerkt tot chopped rovings en samen met het hars op een mal gespoten. Hierdoor is een hogere graad van automatisatie mogelijk. Het aandammen van de materiaalstructuur gebeurt nog manueel.



Figuur 2.9: Hand lay-up en Spray lay-up [5]

2.3.3 Persgieten (E: Compression moulding)

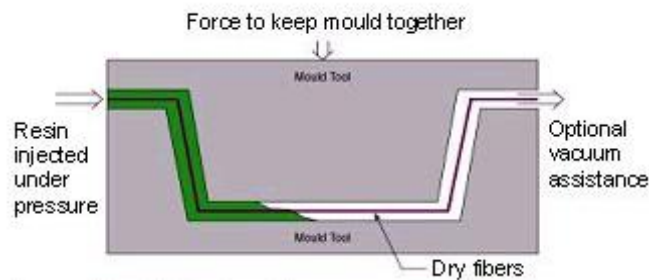
Persgieten is het proces dat gebruikt maakt van BMC en SMC, zie 2.3.1. Het proces is geschikt voor het vervaardigen van kleine werkstukken in grote series. De producten zijn vrij goed afgewerkt en hebben constante afmetingen. Enkele voorbeelden zijn behuizingen voor computers, carrosserie onderdelen, ...



Figuur 2.10: Persgieten [6]

2.3.4 Harsinjectie (Resin injection)

Bij deze techniek worden matten of weefsels in een mal of matrijs gebracht en een laag visceus hars wordt onder druk tussen de matrijzen geïnjecteerd. Dit proces moet voldoende traag gebeuren om verplaatsing van de vezels te voorkomen. Soms wordt een vacuüm aangebracht om het proces iets te vergemakkelijken.

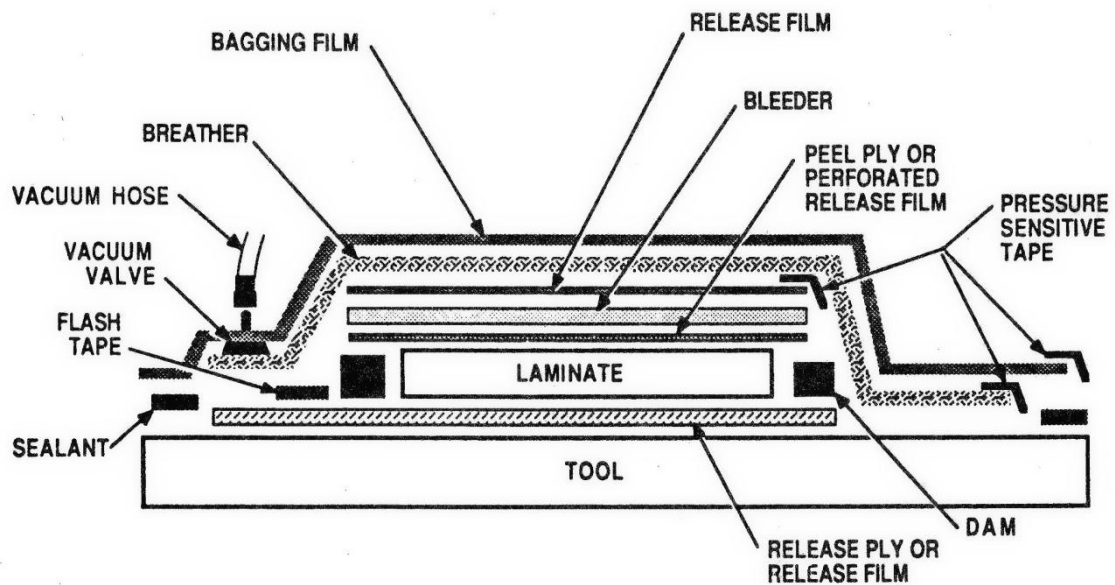


Figuur 2.11: Harsinjectie [7]

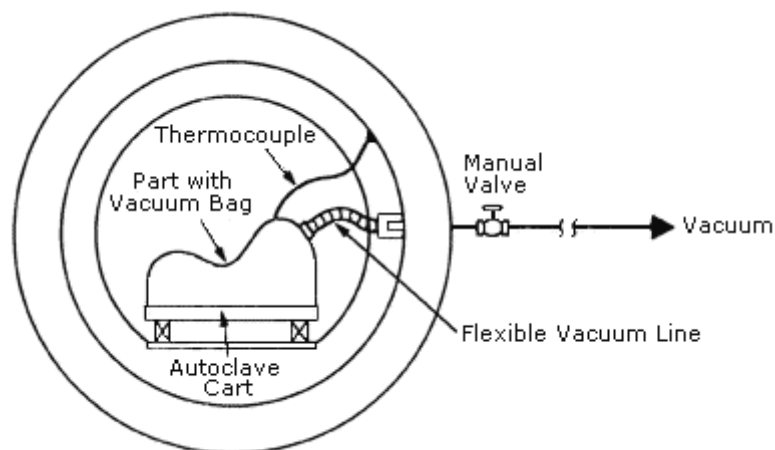
2.3.5 Vacuum bag, pressure bag en autoclaaftechniek

De vacuum bag, pressure bag en autoclaaf methodes hebben een gemeenschappelijk kenmerk: er wordt een uniforme druk aangebracht in het laminaat. De matten of weefsels, vermengd met hars of prepregs, worden in een mal gelegd en vervolgens afgesloten van de atmosfeer door afdichtingstrippen (E: sealant tape) en kunststoffolie. Bij vacuum moulding wordt een onderdruk gecreëerd onder de folie terwijl bij pressure moulding een overdruk boven de folie wordt aangebracht. De autoclaaftechniek combineert beide processen waarbij eveneens een temperatuursregeling mogelijk is.

Onder de vacuümszak zorgen bleeders en breathers voor het vacuümtransport en de opname van het overtollige hars. Gels, scheidingsfolies (E: release films) en weefsels (E: release fabric) dienen voor het niet kleven van het laminaat aan de mal, bleeder of vacuümszak. Scheurfolies (E: peel-ply) laten het overtollige hars door en kunnen heel gemakkelijk verwijderd worden, zodat het product mooi gescheiden blijft van alle boven- en onderliggende lagen. Bovendien geeft een goedgekozen peel-ply een geschikte afwerking van het oppervlak voor nabehandeling, zoals verlijmen of verven.



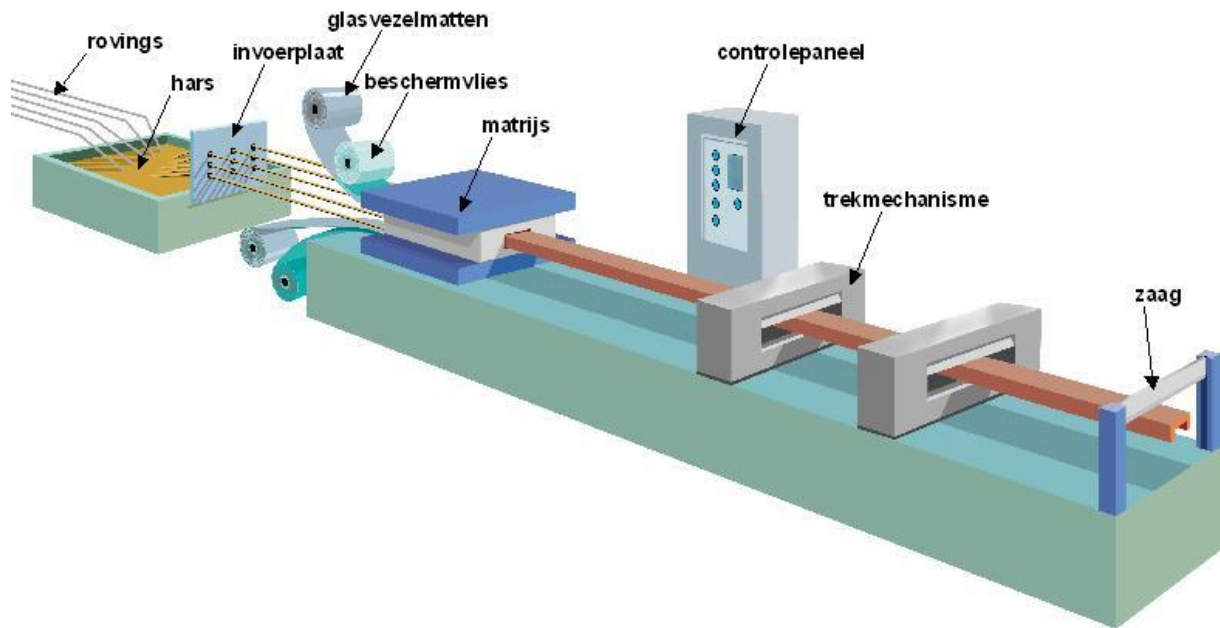
Figuur 2.12: Vacuum bag [8]



Figuur 2.13: Autoclaaf zonder druktoevoer [9]

2.3.6 Pultrusie

Pultrusie is, in tegenstelling tot de meeste andere methodes, een continu proces. De vezels worden doordrenkt in een harsbad. Het overtollig hars wordt afgeschrapt en de vezels worden vervolgens door een verwarmde matrijs getrokken. Het hars hardt uit in de matrijs en een uitgehard profiel verlaat de matrijs. De productiesnelheden gaan van enkele centimeters tot meer dan een meter per minuut.

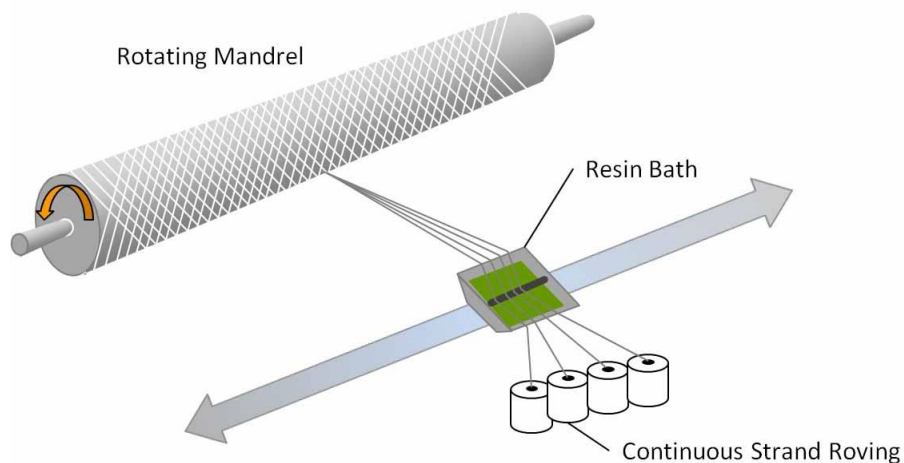


Figuur 2.14: Pultrusie [10]

2.3.7 Wikkelen (E: Filament winding)

De vezels worden terug in de vorm van yarn of roving door een harsbad geleid. Nadien wordt de natte vezel op een roterende mandrel gewikkeld. Een wikkeloog, al dan niet numeriek gestuurd, brengt de bundel op de gewenste plek. De uitharding geschiedt na de voltooiing van het wikkelpoces. De mandrel kan deel uitmaken van het product of dient achteraf verwijderd te worden. Veel gebruikte materialen voor de mandrel zijn: metalen, gips, plastics, smeltbare eutectische zouten, laagsmeltmetalen, ...

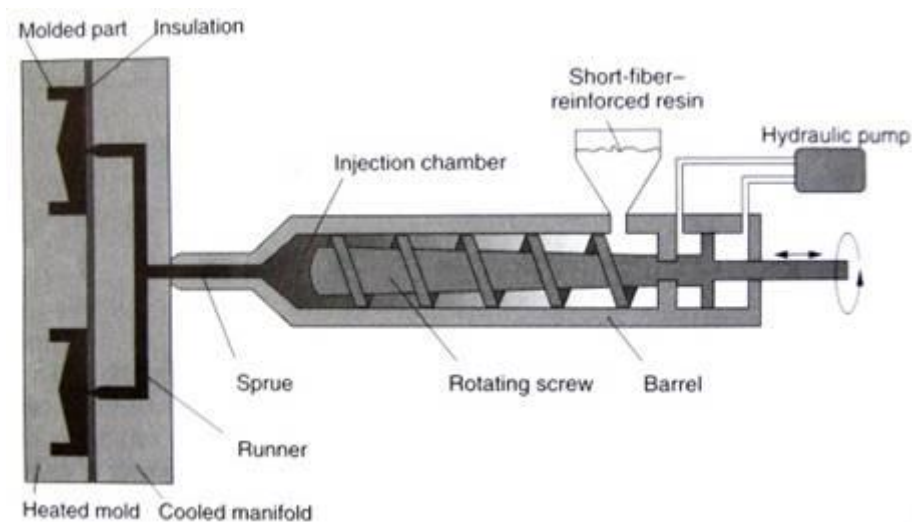
Veelal wordt wikkelen gebruikt bij het vervaardigen van buizen, drukvaten en reservoirs. Tegenwoordig zijn complexere structuren ook mogelijk door numeriek gestuurde machines met 5 vrijheidsgraden.



Figuur 2.15: Schematische voorstelling wikkelpoces [11]

2.3.8 Smitgieten (E: Injection moulding)

Smitgieten is een proces voor de verwerking van thermoplasten. Granulaten (zie 2.3.1) worden na verwarming in een matrijs gespoten. De viscositeit blijft, door de aanwezigheid van vezels, relatief hoog, waardoor hoge injectiedrukken vereist zijn. Hierdoor zijn enkel kleine stukken financieel haalbaar.



Figuur 2.16: Smitgieten [12]

Hoofdstuk 3

Literatuurstudie

Dit hoofdstuk gaat wat dieper in op de gebruikte materialen voor dit thesisonderwerp. Vlas als verstevigingmateriaal en biohars als matrixmateriaal. De materiaaleigenschappen worden theoretisch bekeken en vergeleken met synthetisch geproduceerde materialen.

Tenslotte wordt kort gesproken over de productiemethodes van hedendaagse fietsframes, voornamelijk gericht op koolstof prepregs.

3.1 Biocomposieten

3.1.1 Definitie

Zoals eerder vermeld was het oorspronkelijk doel van deze thesis een ‘bio’-racefiets te produceren. Het begrip ‘bio’ in relatie tot materialen is over het algemeen nog niet eenduidig gedefinieerd. ‘Bio’ is nog geen goed gedefinieerd of wettelijk beschermde kwalificatie voor materialen. Meestal wordt met bio bedoeld dat een aanzienlijk deel van het materiaal gebaseerd is op een biobased grondstof. Het aandeel bio kan komen van de vezel of het hars of van beide. Het begrip ‘bio’ mag niet verkeerd worden opgevat. Men geeft soms de naam bio aan een composiet als dit composiet slechts 5 % biologische bouwstoffen bevat. Dit maakt duidelijk dat ‘bio’ nog geen helder label is. In deze masterproef is het wel degelijk de bedoeling te werken met 100 % biologische componenten.

3.1.2 Biologische drivers

De bewustwording van het bestaan van duurzame materialen, heeft de laatste jaren geleid tot een toegenomen belangstelling voor natuurlijke vezels in vezelversterkte kunststoffen, al dan niet biologische. Dit komt door hun hernieuwbaarheid, hun lage energiebehoefte bij productie, het feit dat ze CO₂ neutraal zijn en in het bezit zijn van goede mechanische eigenschappen. Bedrijven willen minder afhankelijk worden van fossiele grondstoffen en bijhorende problemen, zoals beschikbaarheid en prijschommelingen. Veel ngo's en multinationals leggen zich toe op het minimaliseren van het materiaalgebruik (door het

verhogen van recyclage) en zeggen zich in te spannen voor het sluiten van de materiaalcirkel. Biobased (= hernieuwbaar) materiaal past helemaal in deze filosofie.

Drivers voor het gebruik van natuurlijke vezels:

- 'Bio' en het groene imago
- Hernieuwbare grondstof
- Goede prijs-prestatieverhouding
- Unieke visuele vorm van de composieten op basis van transparante harsen

Drivers voor het gebruik van bioharsen:

- 'Bio' en het groene imago
- Hernieuwbare grondstof
- Minder afhankelijk van fossiele grondstoffen

3.1.3 Toepassingen

Vezelversterkte kunststoffen op basis van natuurlijke vezels vinden tegenwoordig hun weg in de automobiel-industrie. Zo verwerkte de Duitse automobiel-industrie in 2005 ongeveer 11000 ton natuurlijke vezels in combinatie met thermoharders op een totale verwerking van 19000 ton natuurlijke vezels [14]. Verder vinden natuurlijke vezels nog toepassingen in niche markten: bijvoorbeeld fietsen (Museeuw Bikes), catamaran (Flaxcat), carrosserie van een auto (zie Figuur 3.1) en design producten.



Figuur 3.1: Raceauto met verschillende binnen- en buitenpanelen van natuurlijke vezels en biohars, winnaar van de Composites Europe Pioneer Award 2009 (Four Motors GmbH) [13]

Grote toepassingen van bioharsen zijn (nog) niet gekend. Bioharsen zijn nog niet lang op de markt verkrijgbaar, en bij gebruik van 100 % biobased harsen moeten er nog kleine problemen verholpen worden. Mogelijke toepassingen, die door producenten genoemd worden zijn :

- Automobiel- en truck-onderdelen
- Sportartikelen
- Bad en douche toepassingen
- Structurele producten
- Onderdelen van koeltorens

3.2 Natuurlijke vezels: Vlas

Natuurlijke vezels zijn in veel soorten en maten wereldwijd beschikbaar. Een aantal natuurlijke vezelsoorten hebben eigenschappen die, in composiettoepassingen, kunnen concurreren met glasvezels. De productie van natuurlijke vezels (vlas, hennep, kenaf, jute, sisal) ligt een orde van grootte hoger (4500 kton/jaar) dan de productie van glasvezelversterkte kunststoffen (900 kton/jaar) [14]. Dit toont aan dat de vervanging van glasvezelcomposieten door natuurlijke-vezelcomposieten in principe mogelijk zou zijn.

Natuurlijke vezels worden geëxtraheerd uit:

- Stengels: vlas, hennep, jute, kenaf, ramie
- Bladeren: sisal, abaca, banaan, ananas
- Zaden: katoen, kokos

Tijdens de extractie van natuurlijke vezels uit plantenstengels worden de houtachtige delen van het kernmateriaal (ook wel scheven genoemd) gescheiden van de gewenste en sterke vezels, de zogenaamde bastvezels. Het verwijderen van de laatste procenten scheven vergt een inspanning en verhoogt daarmee de kostprijs. De aanwezigheid van scheven in natuurlijke vezelproducten kan zwakke plekken veroorzaken in een composiet. Het percentage scheven is hiermee een belangrijke parameter voor de prijs-kwaliteit verhouding.

Natuurlijke vezels zijn beschikbaar als non-woven, sliver (~ roving), korte en lange vezels. In Figuur 3.2 worden enkele soorten bundeltypes van vlasvezel weergegeven.

De prijs van natuurlijke vezels wordt bepaald door hun zuiverheid en de vorm (lange vezel, korte vezel, non-woven, sliver). ‘Zuiverheid’ heeft betrekking op de eventuele aanwezigheid van plantendelen anders dan de vezel. Een indicatie van de prijsniveaus voor natuurlijke

vezels is weergegeven in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. Hieruit kan afgeleid worden dat natuurlijke vezels qua prijs kunnen wedijveren met glasvezels.



Figuur 3.2: 4 verschillende vlasvezel bundeltypes: (van links naar rechts) non-woven vlas, doubled vlas, roving en yarn [15]

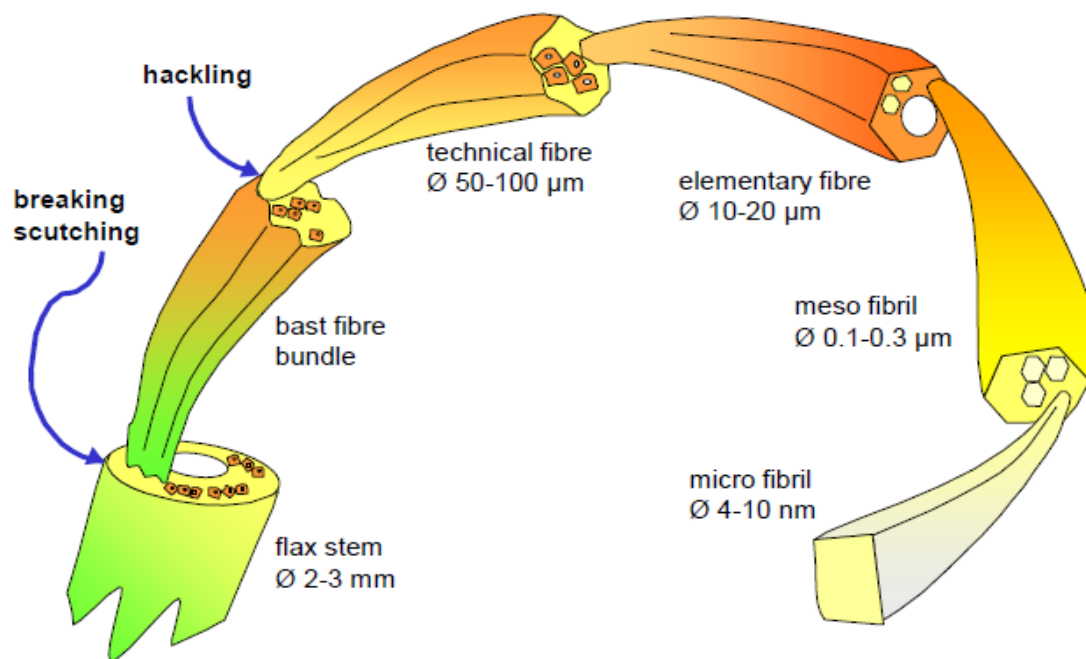
Tabel 3.1: Indicatie van prijzen in 2011 van enkele natuurlijke vezels en glasvezel [14]

VEZELVORM			PRIJS (€/ton)
Vlas	Korte vezel, 5-20 cm	Paar % scheven	650
Vlas	Korte vezel, 5-20 cm	Schoon	1000
Vlas	Lange vezel, 50-80 cm	Schoon	1500 – 2000
Vlas	Non-woven, 1000 g/m ²	~ 1 % scheven	2000
Vlas	Sliver, lange vezel	Schoon	3000-5000
Hennep	Korte vezel, 5-20 cm	Paar % scheven	650
Viscose	Roving		2000
Glas	Roving		2000
Glas	Non-woven		3000

Tabel 3.2: Relatieve prijzen van natuurlijke vezels ten opzichte van glasvezel (€/€) [14]

	VEZEL	MAT	WEEFSEL
Vlas	1.15	1.18	1.05
Hennep	0.46 – 1.38		
Jute	0.27	0.88	0.24 – 0.53
Sisal	0.46 – 0.54		

Natuurlijke vezels zijn op zichzelf ook composieten; een vezelbundel bestaat uit plantencellen (de elementaire vezels), die op hun beurt weer bestaan uit kleinere fibrillen en deze zijn uiteindelijk opgebouwd uit cellulose ketens. Figuur 3.3 geeft een schematische weergave van de structuur van een vlasvezel. Figuur 3.4 toont een dwarsdoorsnede van een gebroken vlasvezelbundel. Zichtbaar zijn de aan elkaar geplakte plantencellen met een diameter van ongeveer 10 μm , met daarin kleinere vezels (fibrillen) met diameters in de orde van 100 nm. Figuur 3.5 geeft het buitenoppervlak van een vlasvezel weer. Indien deze figuur vergeleken wordt met Figuur 2.1, is het duidelijk dat een natuurlijke vezel, hier vlasvezel, helemaal niet zo uniform is als synthetische vezels.

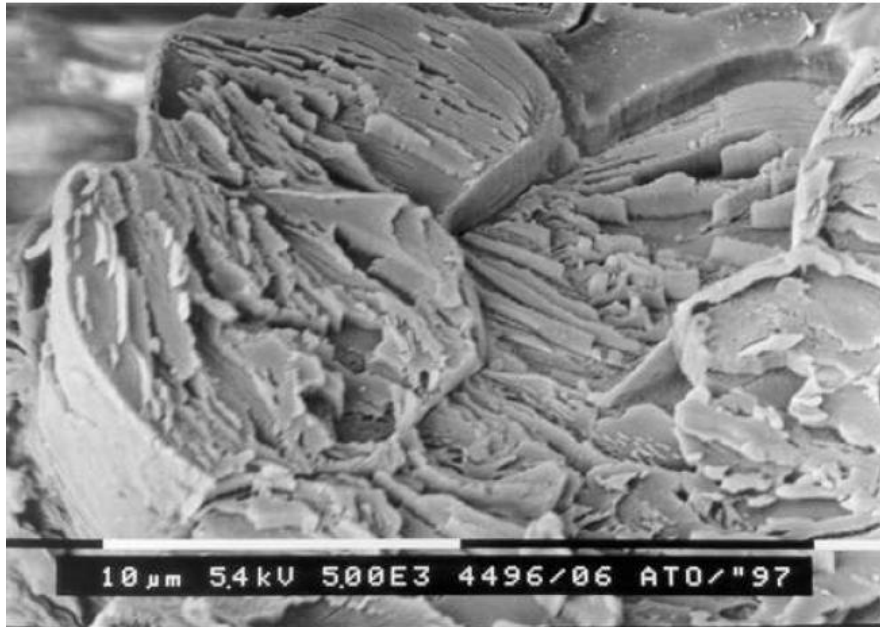


Figuur 3.3: Schematische weergave van de structuur van vlas [14]

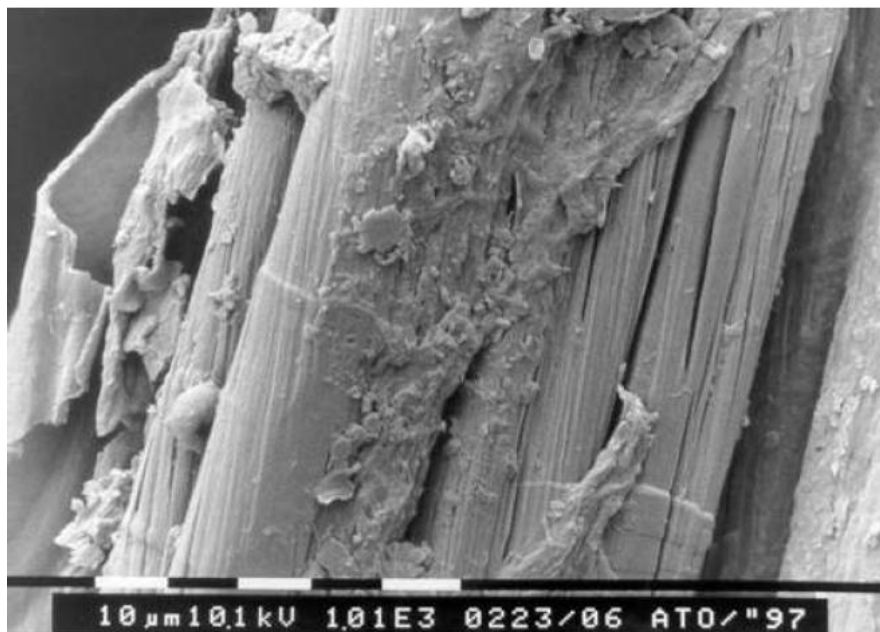
De eigenschappen van natuurlijke vezels zijn afhankelijk van de vezelopbouw, de binding tussen de structuren en de chemische samenstelling van de vezels:

- De vezelsterkte neemt toe met de afnemende hoek van de fibrillen en de lengterichting van de macroscopische vezel, die in het composiet verwerkt wordt. In Figuur 3.5 is de fibrilhoek (10°) van de vlasvezel duidelijk te zien.
- De vezelsterkte neemt in het algemeen toe met het kristallijn cellulose gehalte. Vlas heeft hierbij één van de hoogste gehalten aan cellulose.
- In de bastvezels is de laterale binding in de vezelbundels soms nagenoeg afwezig als gevolg van de plantstructuur. Dit kan de composietsterkte en zelfs de stijfheid

verlagen. Deze zwakke bindingen kunnen verwijderd worden door hekelen, een soort kammen (E: hackling). Hierdoor ontstaan technische vezels, zie Figuur 3.3.



Figuur 3.4: Dwarsdoorsnede van een gebroken vlasvezelbundel [14]



Figuur 3.5: Oppervlak van een vlasvezel waarbij de buitenste celwand verwijderd is [14]

Een interessant gegeven zijn de trekeigenschappen van natuurlijke vezels en hun dichtheid. Enkele waarden zijn gegeven in Tabel 3.3. De eigenschappen hangen sterk af van de geteste vormen: een vezelbundel, technische vezel of plantencelvezel. Andere parameters die metingen kunnen beïnvloeden zijn; vochtgehalte, inspanlengte en belastingssnelheid. De aangegeven eigenschappen in Tabel 3.3 zijn voornamelijk eigenschappen van vezelbundels. Van de meeste vezels is vlas een waardige vervanger voor glasvezel. De specifieke stijfheid (de stijfheid in verhouding tot de dichtheid) van vlasvezel is stukken beter dan deze van glasvezel. Dit maakt van vlas de 'bio'-vezel van de toekomst.

Tabel 3.3: Eigenschappen van enkele natuurlijke vezels [14]

VEZEL	STERKTE [MPa]	STIJFHEID [Gpa]	REK BIJ BREUK [%]	DICHTHEID [g/cm³]
Vlas	500 – 1100	50 – 70	1.3 – 3.3	1.5
Hennep	400 – 800	30 – 60	1.6 – 4	1.48
Jute	200 – 1000	13 – 27	1.5 – 3	1.3 – 1.45
Sisal	500 – 700	9 – 28	3 – 14	1.4
Glasvezel	2000 – 3500	72	2.5	2.55

Natuurlijke vezels bezitten uiteraard ook nadelen. Een inherent nadeel voor de verwerking van de vezels, is de eindige lengte (planten zijn geen oneindige structuren). Hierdoor moet men voor de meeste vezelstructuren een twist in de vezels voorzien, om enige spanning op de vezels mogelijk te maken tijdens de verwerking. Dit is weergegeven in Tabel 3.4, waarbij de afgebeelde vezelstructuren uit Figuur 3.2 onderworpen zijn aan een trekproef. Hoe hoger de treksterkte van de structuren, hoe hoger de twist, hoe beter de bewerkbaarheid van de vezels. Maar de twist heeft een grote invloed op de impregneerbaarheid van het hars. In Tabel 3.5 is te zien dat hoe lager de twist, hoe sterker en stijver het materiaal. De keuze van de uitvoeringsvormen van natuurlijke vezels, hangt vooral af van de bewerkingen die ermee moeten uitgevoerd worden. Dikwijls moeten er toegevingen worden gedaan op het vlak sterkte en stijfheid.

In Tabel 3.6 worden alle voor- en nadelen van natuurlijke vezels t.o.v. glasvezels samengevat.

Tabel 3.4: Eigenschappen van droge uitvoeringsvormen van vlas met hun verwerkingssterkte [15]

VEZELBUNDEL TYPES	TWIST [m^{-1}]	TWIST HOEK [$^{\circ}$]	STERKTE [MPa]
Non-woven vlas	0	0	1.20 ± 0.6
Doubled vlas	0	0	0.9 ± 0.7
Roving	41	7.8	59 ± 12
Yarn	280	19.4	350 ± 65

Tabel 3.5: Eigenschappen van uitvoeringsvormen van vlas tot composiet verwerkt (allen op dezelfde wijze) [15]

VEZELBUNDEL TYPES	STERKTE [MPa]	STIJFHEID [GPa]	Uitgerekende vezelbundel stijfheid [GPa]	Uitgerekende vezelbundel sterkte [MPa]
Non-woven vlas	378 ± 38	28.2 ± 2.6	62.9	844
Roving	377 ± 24	26.2 ± 1.6	51.4	738
Yarn	315 ± 46	23.1 ± 1.2	43.1	589

Tabel 3.6: Voor- en nadelen van natuurlijke vezels t.o.v. glasvezels

VOORDELEN
• Hoge stijfheid, redelijke sterkte • Lage dichtheid • Hernieuwbaar • Materiaal is 100 % CO₂ neutraal • Groeien overal ter wereld. Vlas gedijt zelfs op zeer arme gronden • Minder energie intensief. Zo is voor de productie 1 kg vezelmatten uit vlasvezel 9.55 MJ nodig en 54.7 MJ voor glasvezelmatten
NADELEN
• Eindige lengte, het spinnen van vezels tot garen introduceert een noodzakelijke twist in de vezels die de ‘effectieve vezelsterkte’ verlaagt • Inhomogene dimensies en samenstelling, daarmee samengaan enige onzekerheid qua sterkte en stijfheid

-
- Vochtabsorberend: verwijderen van vocht voor de verwerking is meestal aangewezen voor de vorming van goede composieten
-

3.3 Biohars

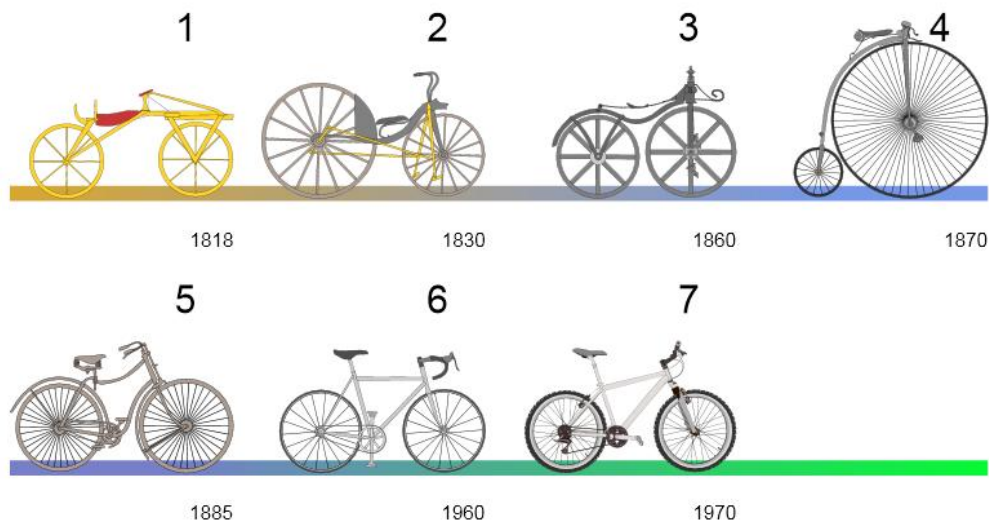
Bioharsen, compatibel met uiteenlopende verwerkingstechnieken, worden in hoog tempo ontwikkeld en een aantal zijn inmiddels commercieel beschikbaar. De meeste daarvan zijn slechts deels biobased. De verwerkingseigenschappen van de beschikbare bioharsen lopen breed uiteen. De mechanische eigenschappen zijn vergelijkbaar met die van onverzadigd polyester. Momenteel zijn weinig toepassingen van bioharsen gekend.

Het biohars, dat gebruikt en getest wordt in dit eindwerk, wordt geleverd door Vosschemie Benelux [16].

3.4 Raceframes

3.4.1 Geschiedenis

De fiets heeft, sedert zijn oorsprong, een grote transformatie ondergaan. In de jaren 1780 ontstond de eerste ‘fiets’, zij het wel een loopfiets zonder stuurinrichting. Dit transportmiddel was uitsluitend bedoeld voor de adel om zich in de Parijse parken te verplaatsen. In 1817 kwam de ontwikkeling in een stroomversnelling door de uitbarsting van de vulkaan Tambora op het eiland Soembawa. Dit veroorzaakte een wereldwijd voedseltekort door aswolken die een hele zomer de aarde omhulden. Al snel kwam het transport tot stilstand omdat de koetsdieren niets te eten hadden. De ‘fiets’ was daarvoor een goede oplossing.



Figuur 3.6: Evolutie van de fiets [17]

Pas rond 1867 is de fiets met pedalen en trapas er gekomen, in de vorm van de hoge bi (nummer 4 in Figuur 3.6). Dit was de eerste fiets in massaproductie, maar tevens de gevaarlijkste door de grote hoogte waar de fietser moet zitten. In 1885 was er dan de fiets met kettingoverbrenging naar het achterwiel. De wielen hoefden niet meer enorm groot te zijn om zich met grotere snelheid te verplaatsen. Vanaf dit moment zijn de fietsen fysiek niet veel meer veranderd.

Samen met het ontstaan van de fiets, ontstonden ook de wielervedstrijden. Zelfs met de loopfietsen werden destijds wedstrijden gehouden. De drang om sneller en beter te zijn dan anderen, heeft er toe geleid dat de fietsen tot op heden blijven evolueren en verbeteren. Lichter, stijver, aërodynamischer, minder rolweerstand, ... zijn de drijfveren om de fiets te blijven innoveren.

Aan de vorm van de fiets mag dan al sinds 1885 weinig veranderd zijn, aan de onderdelen en materialen des te meer. Op het gebied van versnellingen is ook het nodige veranderd. Ouderwetse systemen waarbij de schakelaars op het frame zaten (z.g. *buiscommandeurs*) behoren sinds het midden van de jaren 90 definitief tot het verleden. De schakelaars zitten tegenwoordig verwerkt in de remgrepen. Zo zijn de klikpedalen recent ontwikkeld.

Tegenwoordig worden frames vooral gemaakt van staal, aluminium of carbon. Ook Titanium en magnesium worden gebruikt. Staal is een zeer bewerkbaar materiaal. Daarom hebben nog veel fietsfabrikanten een voorliefde om het grootste deel van hun fietsengamma uit staal te vervaardigen. Een nadeel aan staal is dat het een relatief zwaar materiaal is. Aluminium vangt dit grotendeels op, maar carbonframes (of koolstofframes) zijn de laatste tien jaar aan een sterke vooruitgang bezig. De productiemethodes zijn een stuk duurder dan voor staal en

aluminium. Voor een sterker, lichter en stijver materiaal wil men vaak meer betalen om op die manier ‘de snelste van het pak’ te blijven.

3.4.2 Productiemethodes

De productie van carbonframes wordt vervaardigd met prepreg materiaal (zie 2.3.1). Dit materiaal, koolstof vooraf geïmpregneerd met epoxyhars, is relatief gemakkelijk te bewerken. Het kan eenvoudig rond een voorwerp gelegd worden zonder dat het zich terug verplaatst. Dit is mogelijk omdat een prepreg een ‘sticky’ (plakkerige) structuur heeft.

Van deze eigenschap maken de fietsfabrikanten gebruik om hun frames te produceren. In een eerste stap worden verschillende, vooraf bepaalde, stukken prepreg uit een groot vel gesneden. Dit gebeurt grotendeels robotgestuurd. Deze stukken worden rond een blaasbalg (E: bladder), in de vorm van het toekomstig frame, gelegd/gekleefd. Het geheel wordt vervolgens in een stalen mal gelegd, met een afdruk van het frame. De gesloten mal wordt onder een pers gestoken, die tevens voorzien is van verwarmingselementen. De bladder wordt aangesloten aan een leiding met perslucht. Op deze manier zal de bladder de prepreg tegen de mal duwen. Door de toegevoerde warmte, al dan niet met een bepaald temperatuursverloop, hardt de epoxy volledig uit. Na een lichte afwerking, zoals het verwijderen van bramen, het opschuren van het oppervlak en het aanbrengen van een laklaag, is het frame klaar. Een voorbeeld van een mal en een prepreg is weergegeven in Figuur 3.7.



Figuur 3.7: Mal met koolstof prepreg

Er worden niet alleen frames uit één geheel (E: monocoque) gemaakt. Sommige fabrikanten maken het frame uit meerdere stukken en verlijmen deze achteraf. Zo is er ook het tube – lug concept, waarbij de buizen en verbindingstukken apart worden gemaakt en later samen worden gelijmd met een epoxylijm.

De productie van koolstofframes vergt nog steeds veel handenarbeid. Dit verklaart grotendeels de hoge kostprijs van de producten. Enkele fietsfabrikanten hebben reeds een volledig geautomatiseerde frameproductieomgeving [18].

Hoofdstuk 4

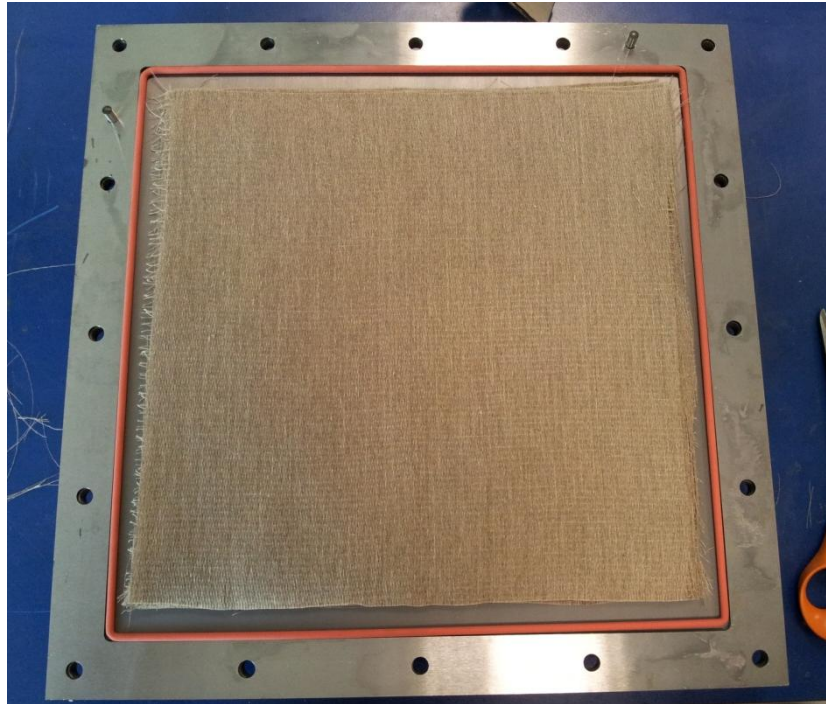
Materiaalkarakterisatie

Om numerieke simulaties te kunnen uitvoeren en materiaaleigenschappen van vlasvezel, in combinatie met biohars, te kunnen vergelijken met andere materialen, moet een materiaalkarakterisatie uitgevoerd worden. Dit gebeurt door testsampels te produceren en vervolgens statisch te belasten.

Het is de bedoeling testsamples te maken door enerzijds vlas-epoxy en anderzijds vlas-biohars te combineren. Zodat naderhand de invloed van het matrixmateriaal kan vergeleken worden. Maar door problemen met de levering, het slecht of niet uitharden van het biohars door mogelijk de verkeerde componenten, wordt de vlas-biohars combinatie niet uitgevoerd. Hierdoor wordt enkel het vlas-epoxy composiet getest. Twee soorten UD-vlasvezel matten zijn ter beschikking: een UD-vezel met en een UD-vezel zonder sizing (zie 2.1). Voor beide vezelstructuren worden testsamples gemaakt en getest.

4.1 Productie testsamples

Voor de productie van de testsamples wordt gebruik gemaakt van een RTM-opstelling. Deze opstelling is beschikbaar in het composietlabo. RTM, Resin Transfer Molding, is een gesloten mal-proces waarbij de vezels tussen de mal worden geplaatst en het hars onder druk door de mal gestuwd wordt. Deze, door het labo zogenaamde RTM-opstelling, is in principe een VIP-opstelling. VIP, Vacuum Infusion Processing, is gelijkaardig aan RTM, maar in die mate verschillend dat het hars nu door middel van vacuüm doorheen de mal wordt getrokken.



Figuur 4.1: De VIP-opstelling



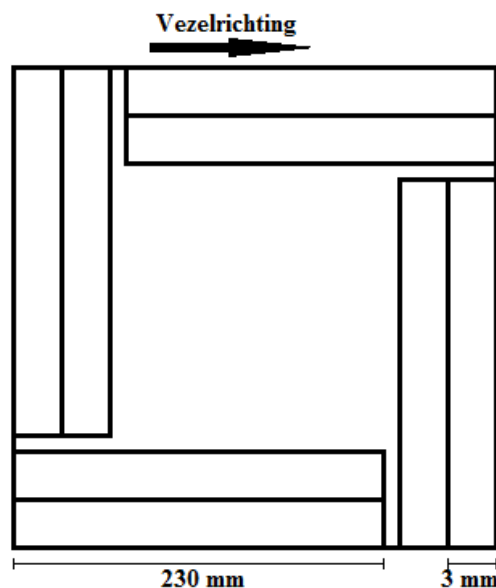
Figuur 4.2: Resintrap

De opstelling bestaat uit twee stalen, vierkante vlakke platen, waartussen stalen strips van 3 mm worden geplaatst. Om vacuüm tussen de mallen te bekomen, wordt een dichtingsrubber aangebracht, zie Figuur 4.1. In de bovenste plaat zitten vijf aansluitingen: één aansluiting in elke hoek, voor de injectie van het hars en één aansluiting in het midden waar het vacuüm wordt aangelegd. Door de correcte plaatsing van de vezelmatten, i.e. maken dat de vezels

overal ongeveer 10 mm van de dichtingsring blijven, ontstaat rondom de vezels een gleuf waar het hars zich uniform kan verdelen. Het hars loopt van buiten naar binnen in de mal en verwijderd zich via de middelste aansluiting. Opdat het hars niet in de vacuüminstallatie zou terechtkomen, wordt een harsopvangpot (E: resintrap, Figuur 4.2) tussen de opstelling en de vacuüminstallatie geplaatst. Deze pot dient na elk proces grondig gereinigd te worden met aceton (reiniger voor onverharde epoxy's) om zijn werking te kunnen behouden.

Op deze manier worden twee UD-vlasplaten (vezels met en zonder sizing) gemaakt van 300 mm x 300 mm en 3 mm dik. Hiervoor zijn 10 lagen UD-vezelmatten nodig.

De benodigde testsamples moeten 230 mm x 30 mm groot zijn. Ook moeten evenveel samples met een 0° als 90° vezelrichting uit elke plaat gehaald worden. De 0° vezelrichting is de richting waarin de vezels in de langsrichting liggen van het sample. De 90° vezelrichting is de dwarsrichting. Uit elke plaat kunnen 8 teststroken gesneden worden, i.e. 4 stroken per vezelrichting, zie Figuur 4.3.



Figuur 4.3: 8 testsampels uit een vlasvezelplaat

4.2 Testopstelling

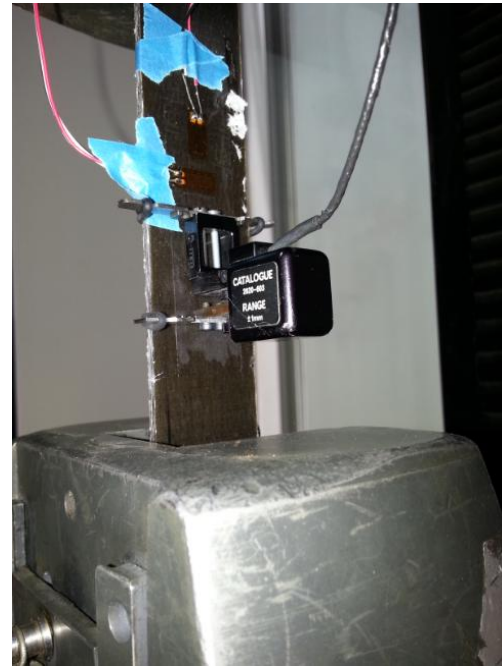
Alle testen werden uitgevoerd volgens de internationale ASTM normen. Specifiek voor deze testen op de 0° en de 90° testsamples werd volgende ASTM norm toegepast:

ASTM D 3039/D 3039M - 00e2 - Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials [19].

Op elke sample worden aluminium taps gekleefd voor een betere werking en hechting in de proefopstelling. De statische trekproeven worden uitgevoerd op een elektromechanische Instron 5800r (Figuur 4.4), met een gekalibreerde 'load cel' van 100kN.



Figuur 4.4: Trekbank: Instron 5800r



Figuur 4.5: De extensometer

Om de rekken te meten van de testsamples tijdens de trekproef, moeten telkens 2 rekstrookjes aangebracht worden. Eén rekstrookje moet in de longitudinale richting liggen en de andere in de dwarsrichting. Het type rekstrookje (E: strain gauge) is CEA-06-250UN-350, door Vishay. Ze hebben een weerstand van 350Ω . Het kleven van de rekstrookjes gebeurt met M-Bond 200 adhesive kit, op een heel secure manier. Omdat de rekstrookjes niet altijd correct werken, wordt ter controle een extensometer aangebracht om de longitudinale rek te meten. Het type extensometer is een Instron 2620-603 dynamische rekstrook extensometer met een absolute verplaatsing van $\pm 1 \text{ mm}$ (Figuur 4.5). De meetarmen van de extensometer zijn 25 mm lang, waardoor rekken tot 4 % kunnen opgemeten worden.

Alle signalen worden verwerkt met een National Instruments NI cDAQ-9172 meetkaart in combinatie met LabVIEW software. De sampling frequentie van alle signalen is 15 Hz. Elk rekstrookje wordt op voorhand gekalibreerd en gecontroleerd op fouten door de meetkaart.

Het is snel duidelijk dat de eigenschappen van de 0° en de 90° richting sterk zullen verschillen, aangezien UD-materiaal gebruikt wordt. In volgend subhoofdstuk worden de

resultaten van beide richtingen elk afzonderlijk besproken. Ook worden de twee soorten vlasvezels naast elkaar uiteengezet en vergeleken.

4.3 Resultaten

Tijdens de proeven wordt, uit voorzorg, de extensometer bij 1 % rek verwijderd. Hierdoor wordt beschadiging van de extensometer vermeden bij het falen van het testsample. Bij de 90° vezelrichting wordt de extensometer nooit toegepast wegens het vroegtijdig kraken van de samples. Dit impliceert uiteraard dat de ultieme longitudinale rek $\varepsilon_{11,ult}$ enkel gemeten kan worden door het rekstrookje. Uit de vergelijking van het longitudinale rekstrookje en de extensometer blijkt snel dat de waarden over het algemeen zeer goed overeenkomen, zie Figuur 4.8 en Figuur 4.9 (ook is er het moment te zien waar de extensometer wordt verwijderd door het vlakke stuk in de curven). Daaruit wordt besloten de berekeningen van de stijfheidmodulus E_{11} en de Poisson coëfficiënt ν_{12} enkel met behulp van de rekstrookmetingen uit te voeren. Alle testen worden uitgevoerd bij een verplaatsingssnelheid van de trekarm van 2 mm/min.

4.3.1 Trekproef op de 0° samples

Bij beide testreeksen is telkens maar 1 sample gebroken in het midden van het proefstuk. De andere samples zijn gebroken net aan de rand van de aluminium tabs. Dit kan verklaard worden doordat de samples niet gealigneerd (soms zijn enkele tienden van een millimeter uit center voldoende) in de opstelling kunnen geplaatst worden. Figuur 4.6 en Figuur 4.7 tonen de geteste samples.



Figuur 4.6: 0° - Vlasvezel met sizing



Figuur 4.7: 0° - Onbehandelde vlasvezel

Tijdens de test worden de longitudinale rek ε_{11} , de transversale rek ε_{22} en de trekkracht F van de trekbank opgemeten. Voor elk testsample wordt de correcte breedte x gemeten. Deze breedte vermenigvuldigd met de dikte van 3 mm, geeft de belastbare oppervlakte van het sample. Hieruit kan de spanning σ_{11} in [MPa] berekend worden:

$$\sigma_{11} = \frac{F}{A} = \frac{F}{3 \cdot x} \quad (4.1)$$

De Poisson coëfficiënt wordt berekend uit de twee rekmetingen:

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (4.2)$$

Figuur 4.10 en Figuur 4.11 tonen de berekende Poisson coëfficiënten. In het begin van de metingen zijn de rekken klein, dus $\nu_{12} \approx 0/0 \rightarrow \infty$ bevat veel ruis. Hoe verder de metingen vorderen, hoe stabielere de Poisson coëfficiënt is. Uiteindelijk neemt de Poisson coëfficiënt een stabiele waarde aan.

Young's Modulus E_{11} wordt bekomen door de rico van de regressierechte te nemen, die door het begin van de trek-rek curve loopt. Met andere woorden de rico van de raaklijn aan de trek-rek curve. De trek-rek curves worden weergegeven in Figuur 4.12 en Figuur 4.13. De grafieken geven duidelijk een niet-lineair gedrag van de materialen weer.

In Tabel 4.1 en Tabel 4.2 zijn de eigenschappen van de 0°-samples weergegeven. De invloed van de sizing is moeilijk te beschrijven aan de hand van de uitgerekende eigenschappen. De waarden liggen allen in dezelfde grootte orde en de spreiding is nog relatief groot, waardoor een conclusie trekken bijna onmogelijk is. De spreiding kan toegeschreven worden aan de eigenschappen van vlasvezel. Vooral de niet-uniformiteit van de vlasvezels speelt een grote rol. Om een duidelijker beeld te krijgen van de verschillen tussen het al dan niet toepassen van sizing, zou het aantal testsamples een stuk groter moeten zijn.

Indien de eigenschappen worden vergeleken met de eigenschappen van prepreg UD-vlasvezel, zie Tabel 4.3 en [3], dan valt op dat het prepreg materiaal ongeveer 10 % sterker en 10 % stijver is. Uit 2.3.1 is geweten dat prepreg een hogere kwaliteitswaarde heeft en daardoor betere eigenschappen heeft na verwerking. Het vezelvolumegehalte bij de testsamples speelt ook een rol. Zo zal bij de prepreg het vezelvolumegehalte hoger liggen, omdat bij de productiemethode het overtollige hars wordt verdreven. Dit is niet het geval bij de zelf geproduceerde samples omdat een voorgedefinieerd volume volledig gevuld wordt met het hars. Indien meer dan 10 lagen UD-materiaal in de mal zou geplaatst worden, zouden de eigenschappen dus verbeteren.

Tabel 4.1: Treksterkte eigenschappen van de 0°-richting onbehandeld UD-vlasvezel

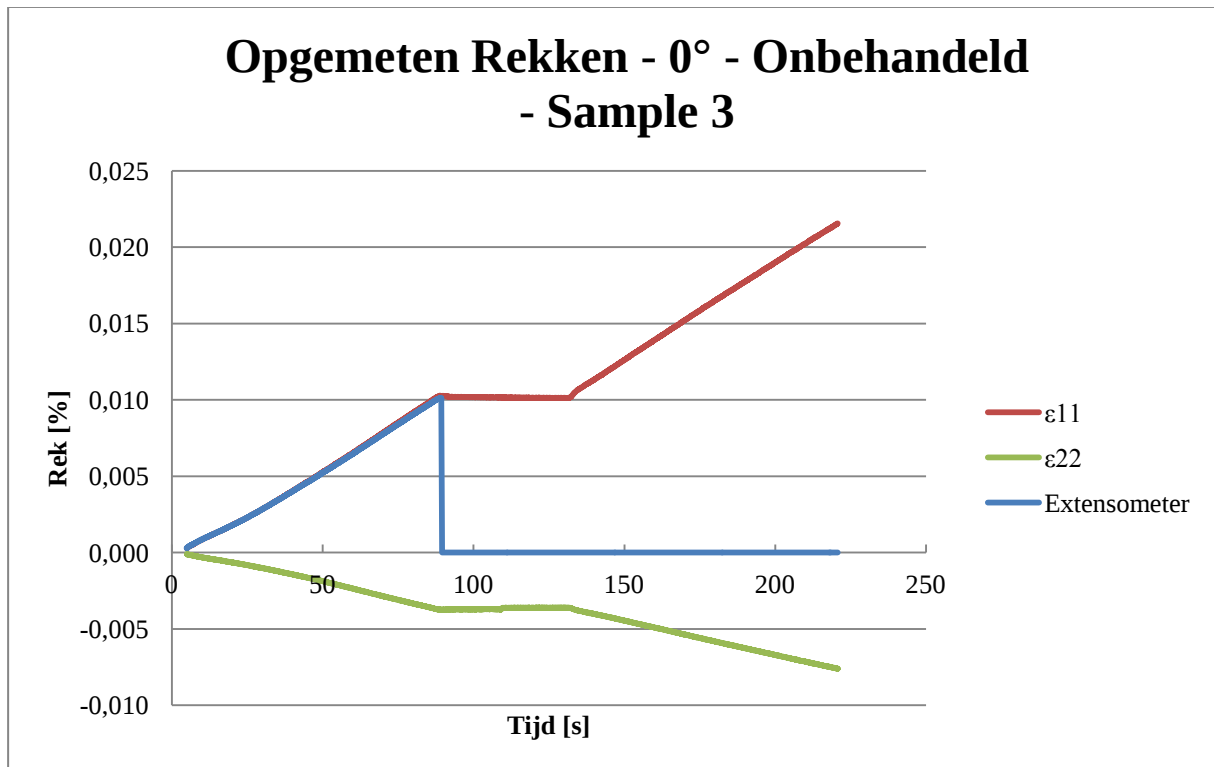
	$\sigma_{11,ult}[MPa]$	$\varepsilon_{11,ult} [\%]$	$E_{11}[GPa]$	$\nu_{12}[-]$
Sample 1	264.89	2.16	27.26	0.33
Sample 2	270.95	2.18	23.38	0.34
Sample 3	261.30	2.15	21.06	0.35
Sample 4	265.44	2.15	22.04	0.37
Gemiddelde	265.65	2.16	23.44	0.35
Standaard deviatie	3.98	0.01	2.72	0.02

Tabel 4.2: Treksterkte eigenschappen van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing

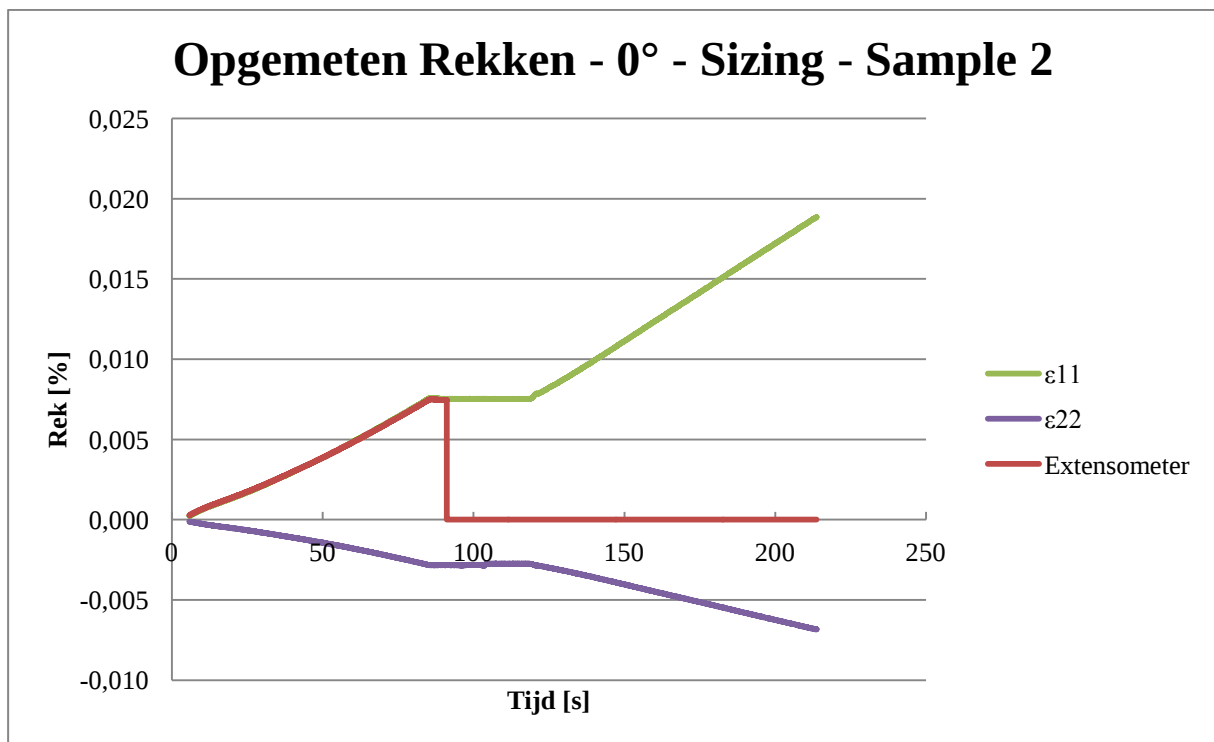
	$\sigma_{11,ult}[MPa]$	$\varepsilon_{11,ult} [\%]$	$E_{11}[GPa]$	$\nu_{12}[-]$
Sample 1	268.95	1.97	22.65	0.35
Sample 2	250.52	1.89	24.38	0.36
Sample 3	249.27	1.79	24.47	0.36
Sample 4	256.44	1.90	23.48	
Gemiddelde	256.29	1.88	23.74	0.36
Standaard deviatie	9.00	0.07	0.85	0.01

Tabel 4.3: Treksterkte eigenschappen van 0°-richting prepreg UD-vlasvezel [3]

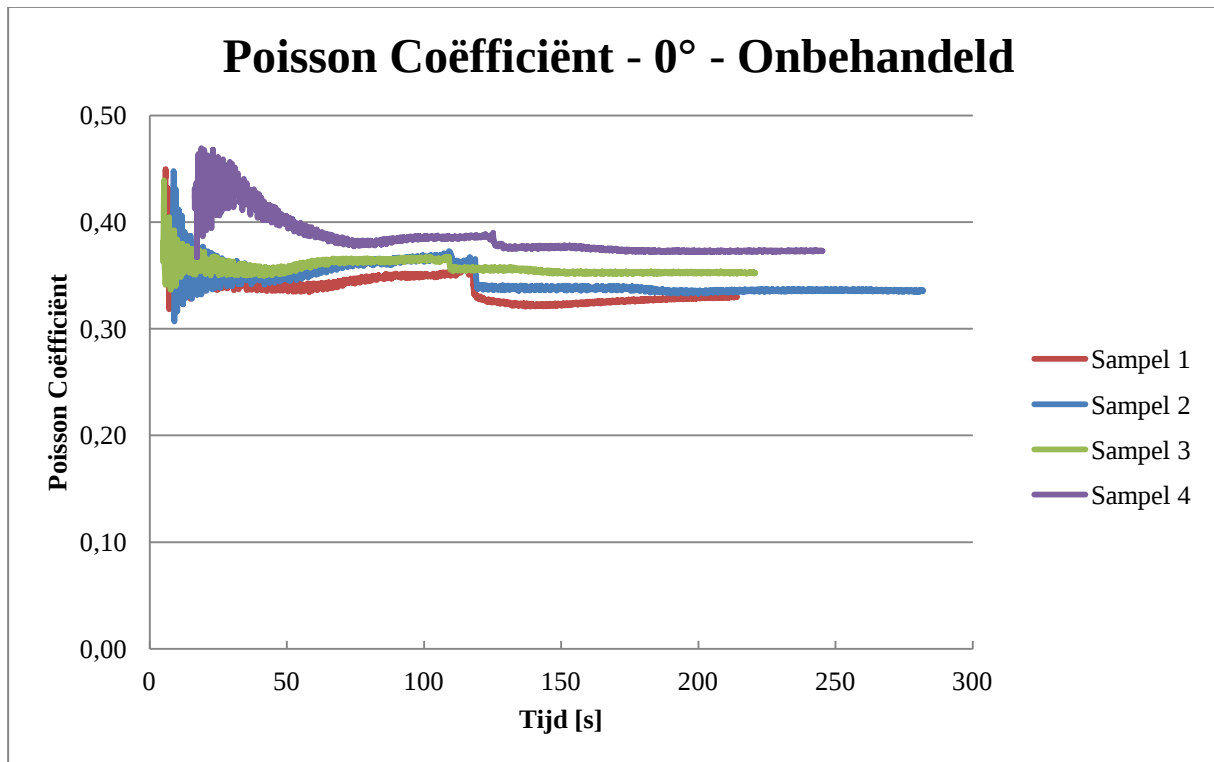
	$\sigma_{11,ult}[MPa]$	$\varepsilon_{11,ult} [\%]$	$E_{11}[GPa]$	$\nu_{12}[-]$
Gemiddelde	290.58	1.63	27.20	0.36
Standaard deviatie	19.00	0.08	0.38	0.017



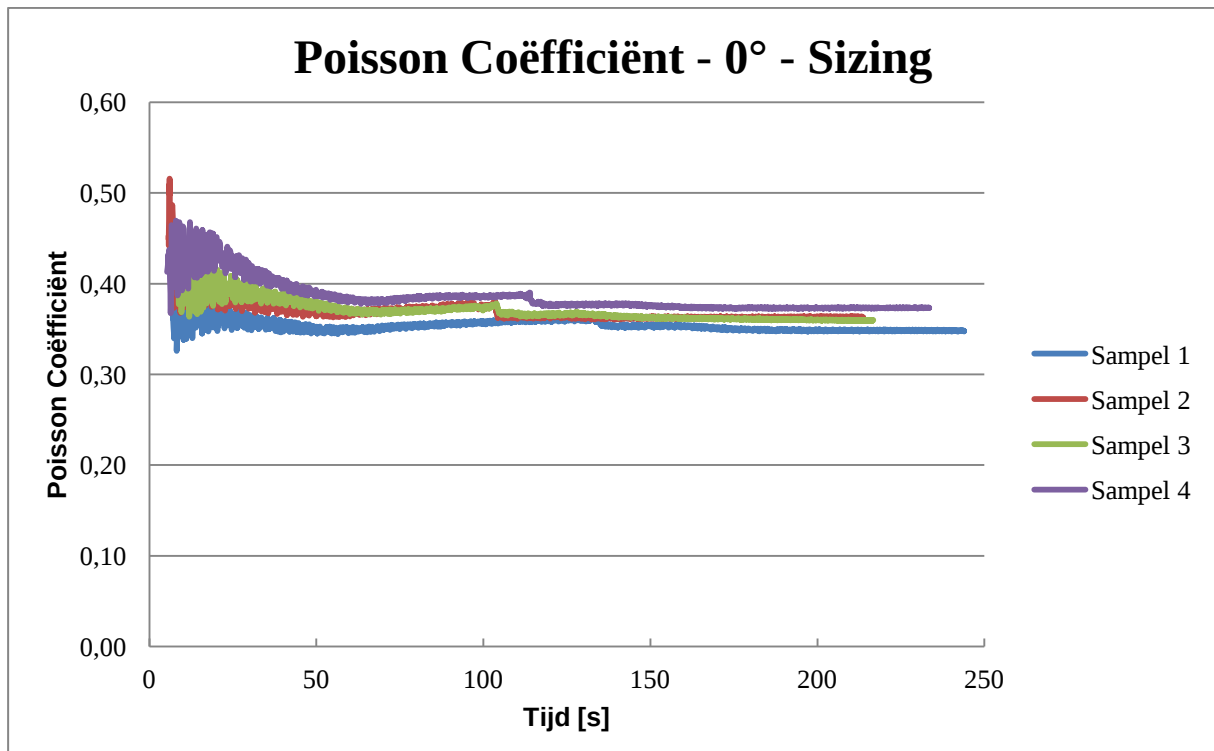
Figuur 4.8: Opgemeten rekken van de 0°-richting onbehandeld UD-vlasvezel



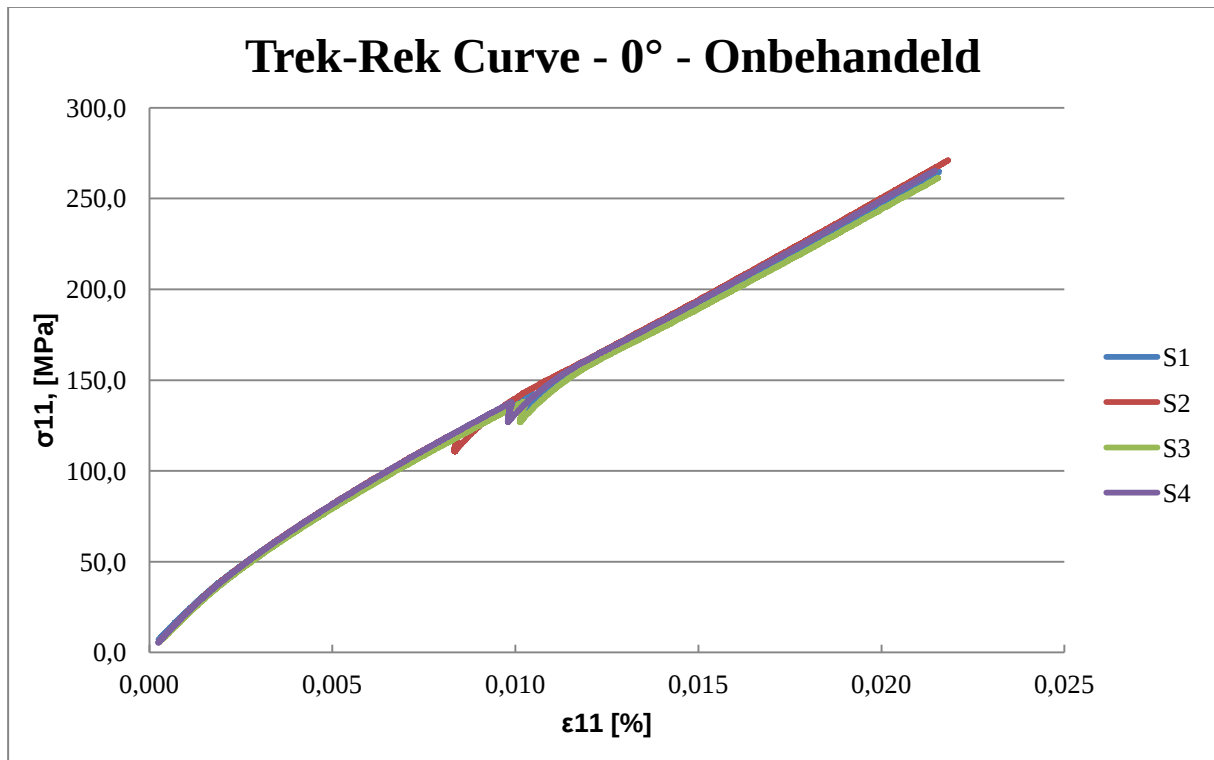
Figuur 4.9: Opgemeten Rekken van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing



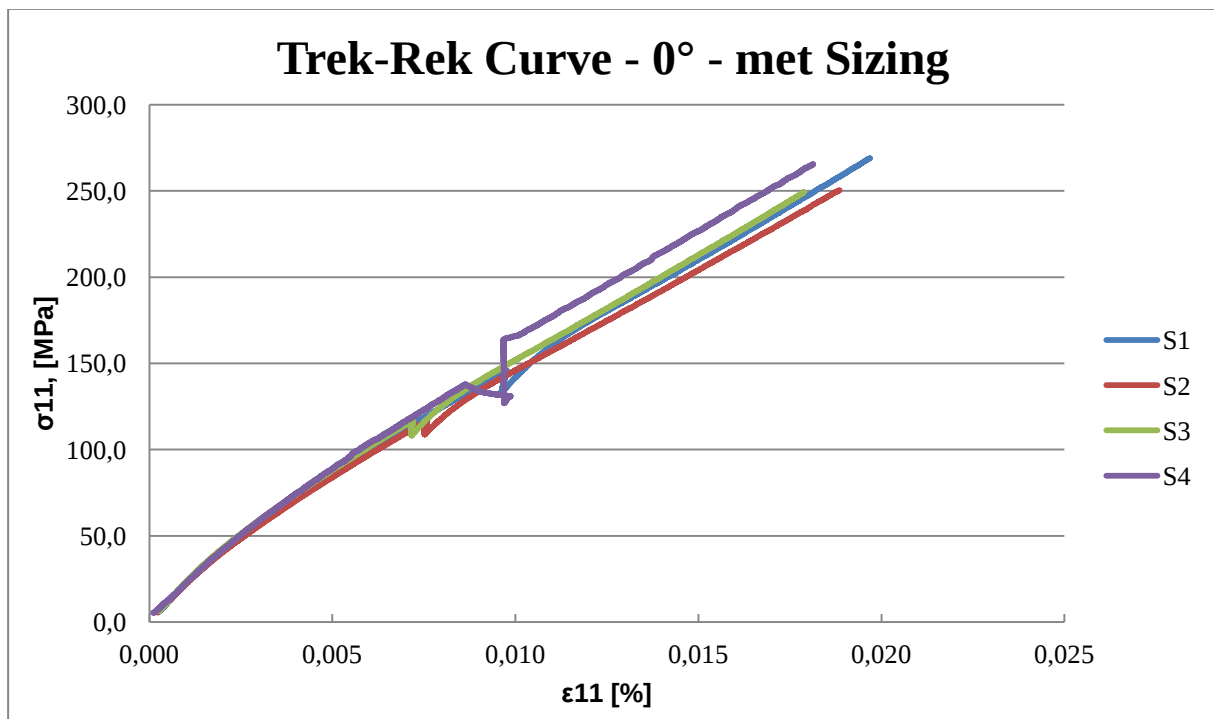
Figuur 4.10: Uitgerekende Poisson Coëfficiënt van de 0°-richting onbehandeld UD-vlasvezel



Figuur 4.11: Uitgerekende Poisson Coëfficiënt van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing



Figuur 4.12: Trek-Rek Curve van de 0°-richting onbehandelde UD-vlasvezel



Figuur 4.13: Trek-Rek Curve van de 0°-richting UD-vlasvezel met sizing

4.3.2 Trekproef op de 90° samples

Zoals eerder vermeld, wordt bij deze proeven de extensometer niet gebruikt uit schrik voor beschadiging. Er kan verwacht worden dat de eigenschappen in de richting loodrecht op de vezelrichting sterk zullen verschillen van vorige resultaten. In deze proef wordt de longitudinale rek ε_{22} , de transversale rek ε_{11} en de trekkracht F opgemeten. De meeste samples zijn gebroken in de tabs, zie Figuur 4.14 en Figuur 4.15.



Figuur 4.14: 90° - Vlasvezel met sizing



Figuur 4.15: 90° - Onbehandelde vlasvezel

Opnieuw kan, met behulp van de dikte en breedte van de samples, de spanning σ_{22} berekend worden. Zonder extensometer worden de transversale stijfheidsmodulus E_{22} en de Poisson coëfficiënt $\nu_{21} = -\varepsilon_{11}/\varepsilon_{22}$ met de rekstrook data bepaald. Figuur 4.16 en Figuur 4.17 geven de trek-rek curves van de geteste materialen weer. De stijfheidsmodulus wordt terug bepaald door de rico van de regressierechte. In Tabel 4.4 en Tabel 4.5 worden de bekomen eigenschappen weergegeven.

Het is alweer moeilijk uit te maken of de sizing al dan niet een invloed uitoefent, met dezelfde reden als in 4.3.1. De eigenschappen van prepreg UD-vlasvezelmateriaal staan in Tabel 4.6, [3]. In de transversale richting hebben de materialen qua stijfheid ongeveer dezelfde waarden. De sterkte van de prepreg is dan weer enkele procenten minder dan de zelf geproduceerde samples. In deze belastingsrichting is het overwegend de matrix die de sterkte en de stijfheid bepaald, de vezels hebben weinig of geen invloed. Het is mogelijk dat het hars, gebruikt in de prepreg, minder sterk is dan het hars gebruikt voor de infusie.

Tabel 4.4: Treksterkte eigenschappen van de 90°-richting onbehandeld UD-vlasvezel

	$\sigma_{22,ult} [MPa]$	$\varepsilon_{22,ult} [\%]$	$E_{22} [GPa]$	$\nu_{21} [-]$
Sample 1	33.39	1.25	6.31	0.064
Sample 2	35.04	1.25	4.73	0.071
Sample 3	31.17	0.86	7.28	0.085
Sample 4	35.92	1.45	4.67	0.058
Gemiddelde	33.88	1.20	5.75	0.070
Standaard deviatie	2.09	0.25	1.27	0.012

Tabel 4.5: Treksterkte eigenschappen van de 90°-richting UD-vlasvezel met sizing

	$\sigma_{22,ult} [MPa]$	$\varepsilon_{22,ult} [\%]$	$E_{22} [GPa]$	$\nu_{21} [-]$
Sample 1	32.09	0.79	5.92	0.081
Sample 2	32.44	0.78	5.53	0.081
Sample 3	33.11	0.86	4.91	0.072
Sample 4	28.01	0.63	5.67	0.078
Gemiddelde	31.41	0.76	5.51	0.078
Standaard deviatie	2.31	0.10	0.43	0.004

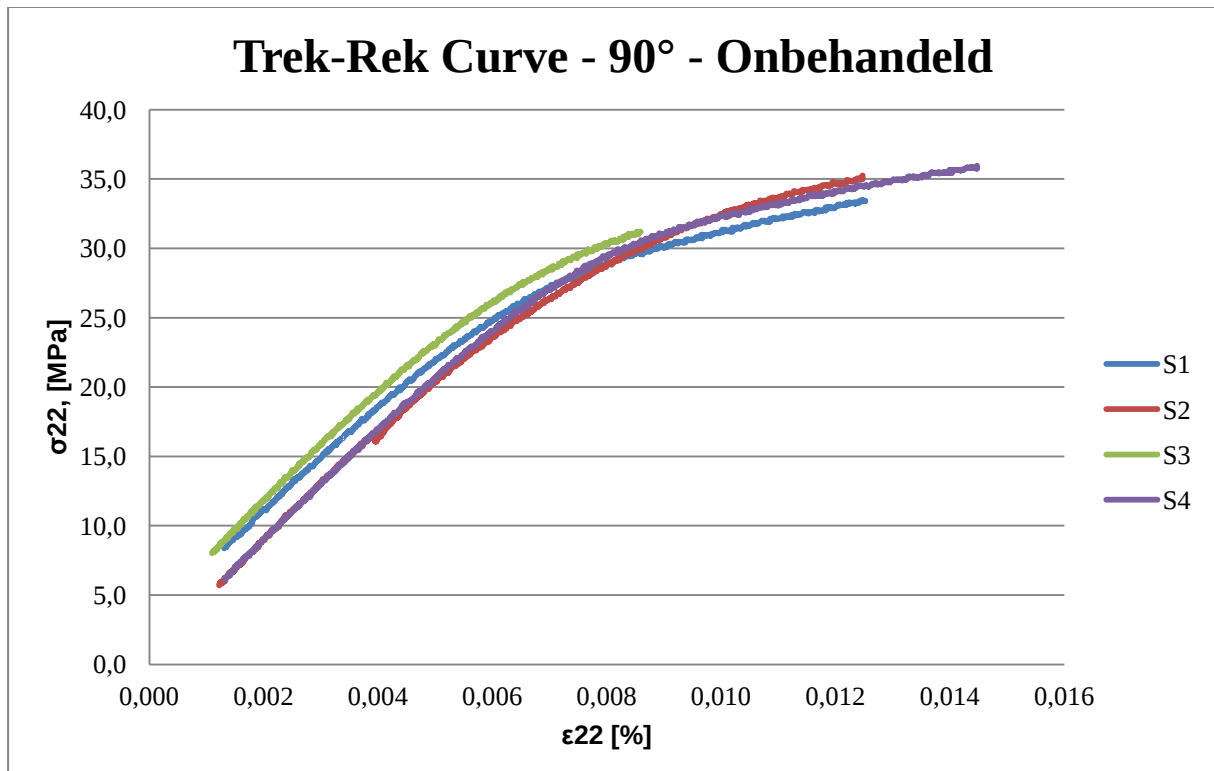
Tabel 4.6: Treksterkte eigenschappen van 0°-richting prepreg UD-vlasvezel [3]

	$\sigma_{22,ult} [MPa]$	$\varepsilon_{22,ult} [\%]$	$E_{22} [GPa]$	$\nu_{21} [-]$
Gemiddelde	25.52	0.52	5.13	0.104
Standaard deviatie	1.63	0.064	0.17	0.013

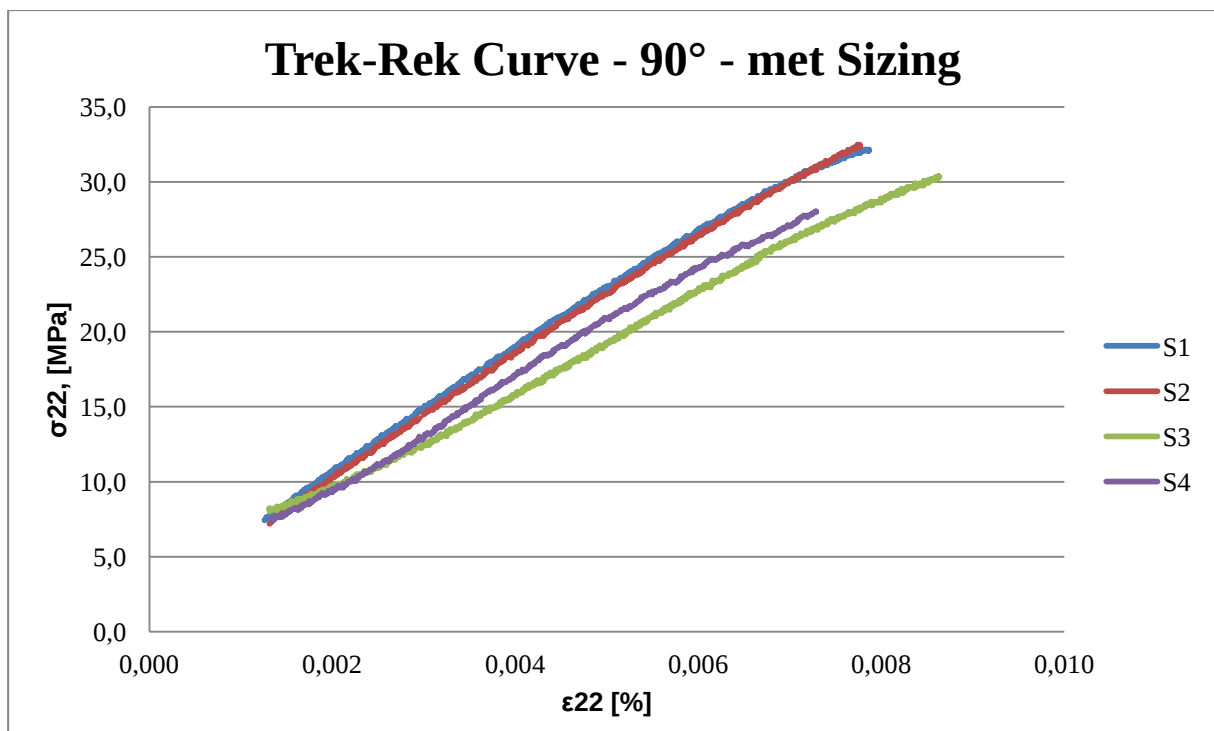
Er bestaat een theoretische relatie tussen de Poisson coëfficiënten ν_{12} en ν_{21} , en de stijfheidsmoduli E_{11} en E_{22} :

$$\nu_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \cdot \nu_{12} \quad (4.3)$$

Gebruik makend van de gemiddelde waarden, wordt $\nu_{21} = 0,084$ voor de UD-vlasvezel met sizing. Dit is een goede benadering van de opgemeten waarde, rekening houdend met de verdeling op de meetwaarden.



Figuur 4.16: Trek-Rek Curve van de 90°-richting onbehandelde UD-vlasvezel



Figuur 4.17: Trek-Rek Curve van de 90°-richting UD-vlasvezel met sizing

Hoofdstuk 5

Ontwerp en Productieprocessen

Bij het ontwerp van het frame moet er rekening gehouden worden met een aantal factoren. Het is niet mogelijk om zomaar de gebruikelijke productiemethodes voor raceframes over te nemen. In 5.1 wordt hier dieper op ingegaan en wordt het frame ontworpen. Een grote hulp kwam van mensen die hun ervaringen op het internet postten, zoals [20], [21]. Hoe de productie van het frame in zijn werk gaat, hangt voornamelijk af van het ontwerp.

5.1 Ontwerp van het frame

De ontwerpfactoren zijn afhankelijk van:

- Het beschikbare materiaal: UD-vlasvezelmatten (zowel met en zonder sizing), vlasvezel yarn en roving, epoxyhars, biohars, prepreg op basis van vlas en epoxyhars.
- Budget
- Voorhanden productie installaties
- De vormgeving van een ‘fiets’-frame
- Sterkte- en stijfheidseisen die gesteld worden aan raceframes

Omdat het oorspronkelijk de bedoeling was een frame te produceren uit vlasvezel en biohars, wordt geen gebruik gemaakt van de prepreg (op een kleine test na, zie 5.3). Hierdoor wordt de mogelijkheid opgehouden om biohars te gebruiken. Door deze keuze, is het moeilijk frames te maken op de manier zoals de meeste fietsfabrikanten werken (zie 3.4.2). Het materiaal leent zich hier niet toe.

Al vlug is de optie genomen om de buizen en de verbindingstukken (E: lugs) afzonderlijk te produceren. Het is namelijk om budgettaire redenen onmogelijk een monocoque frame te fabriceren. Het buis – lug model laat een grote vrijheid toe in productiemethodes.

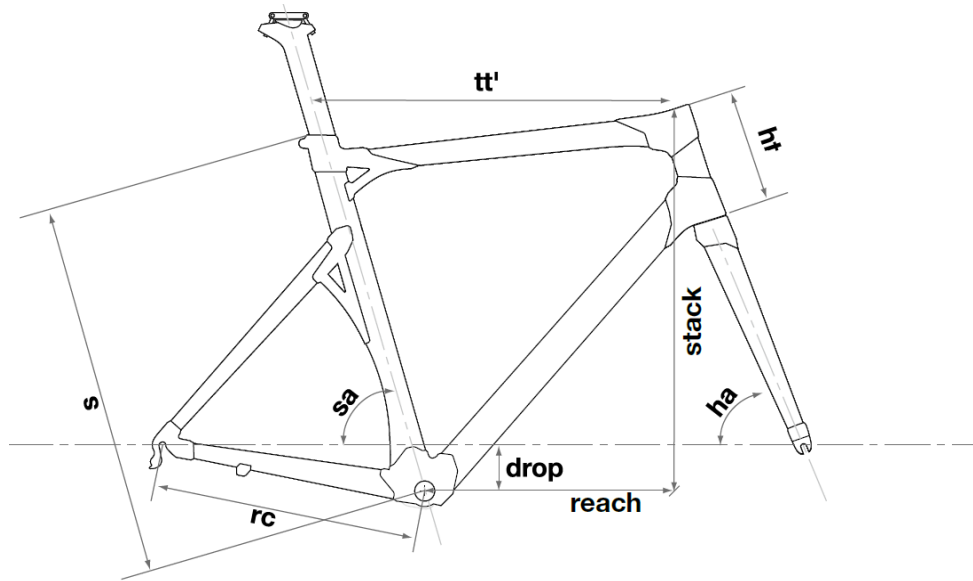
Er is ook de mogelijkheid om af te wijken van de conventionele frameopbouw met driehoekstructuren. Een voorbeeld hiervan is het Z-frame, Figuur 5.1. Opnieuw zijn het beschikbaar materiaal en de installaties een beperkende factor. Elk onderdeel moet uitharden in een verwarmde omgeving. De ovens in het composietlabo dienen hiervoor aangewend te worden. De grootte van de componenten moeten beperkt blijven om in de ovens te passen.



Figuur 5.1: Z-frame [22]

Er wordt voor een cilindervormige buis gekozen. Om binnen- en buitenmallen te maken lijkt dit de meest voor de hand liggende keuze. Het is namelijk gemakkelijk ronde elementen te draaien op een draaibank die kunnen dienen als mallen.

Tenslotte moeten de maten bepaald worden. Op de markt zijn er voor elk fietsmodel verschillende framematen voorhanden, naargelang de grote van de fietser. Deze maten verschillen nauwelijks van fabrikant tot fabrikant. Er wordt gekozen om een frame te ontwerpen met maat 57. Dit getal met eenheid centimeter, stelt de afstand voor van de trapas tot waar de zadelpen in het frame gebracht wordt. Tabel 5.1 geeft de framematen weer. De daarbij horende afmetingen worden weergegeven in Figuur 5.2.



Figuur 5.2: Framematen [18]

Tabel 5.1: Framematen [18]

Size	s [mm]	tt' [mm]	ht [mm]	stack [mm]	reach [mm]	ha [mm]	sa [mm]	rc [mm]	drop [mm]	Lengte fietser [cm]
50	518	531	131	533	378	72.5	74	405	69	<172
53	537	543	151	552	385	72.5	74	405	69	170-177
55	555	560	171	571	396	72.5	74	405	69	175-182
57	573	579	191	590	410	72.5	74	405	69	180-188
60	591	588	211	609	413	72.5	74	405	69	>188

Met behulp van bovenstaande waarden, wordt het frame getekend in Solidworks. De keuze voor de maten van enkele frame-onderdelen staan in Tabel 5.2. Sommige afmetingen, zoals de inwendige diameter van de buizen, zijn niet ingevuld, omdat deze afhangen van de sterkte die vereist is. Met behulp van abaqus kunnen die resterende afmetingen bepaald worden. Voorlopig wordt voor alle onderdelen een dikte van 3 mm gekozen. Tijdens de productie wordt deze dikte nagestreefd, in combinatie met de vastgelegde afmetingen uit Tabel 5.2.

Tabel 5.2: Afmetingen frame-onderdelen

	Inwendige diameter [mm]	Uitwendige diameter [mm]
Buizen	-	40
Lugs - Buisingen	40	-
Headtube Lug – Voorvork ingang	44	50
BottomBracket Lug – Trapas ingang	41	-

De afmetingen van de headtube-lug (i.e. de lug waar de stuurpen moet inkomen) worden bepaald door de keuze van de headset, i.e. de lagering. Er bestaan honderden types headsets, waarvan velen een specifieke afwerking van de headtube vereisen, zoals inwendige afschuiningen. Omdat dit moeilijk te verwezenlijken is, wordt een headset verkozen, waarbij een rechte headtube kan gebruikt worden. De Orbit Z van FSA (Figuur 5.3) is zo'n headset waarbij cups in de headtube moeten geduwd worden. Hiervoor is een inwendige- en uitwendige diameter van respectievelijk 44 mm en 50 mm vereist.

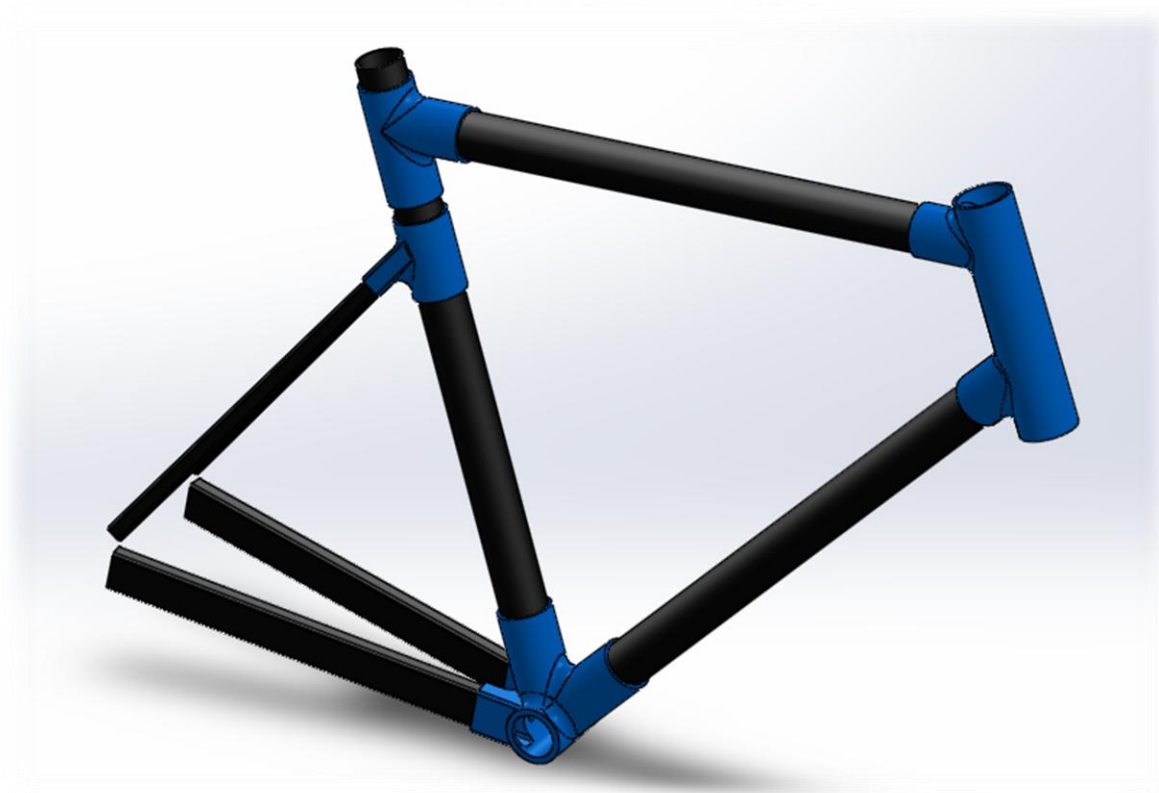
**Figuur 5.3:** Headset Orbit Z van FSA [23]

Voor de bottombracket lug (de lug aan de trapas) is de maat van de trapas bepaald door de keuze van bottom bracket shell. Dit is de behuizing waarin de lagering van de trapas moet komen. Deze shells bestaan in allerlei maten en soorten. Hier wordt gekozen voor een shell met interne Engelse schroefdraad, 1.37 x 24 TPI, lengte 69 mm en 41 mm diameter (Figuur 5.4). Deze shell is compatibel met de meest voorkomende bottom brackets, zoals deze van Shimano.



Figuur 5.4: Bottom Bracket Shell [24]

Normaal gezien dient ook de achternok, waar het achterwiel ingeklemd wordt, gedimensioneerd te worden. De productie zal evenwel niet tot stand komen wegens tijdsgebrek. Toch worden er in Solidworks buizen getekend om een idee te krijgen van de vorm van het frame. De profielen zijn rechthoekig met afmetingen 25 mm x 15 mm. In Figuur 5.5 staat het frame, met in het blauw de lugs, en in Figuur 5.6 het frame zonder de achternok.



Figuur 5.5: Het frame, met achternok



Figuur 5.6: Het frame, zonder achtersvork

5.2 Buizen

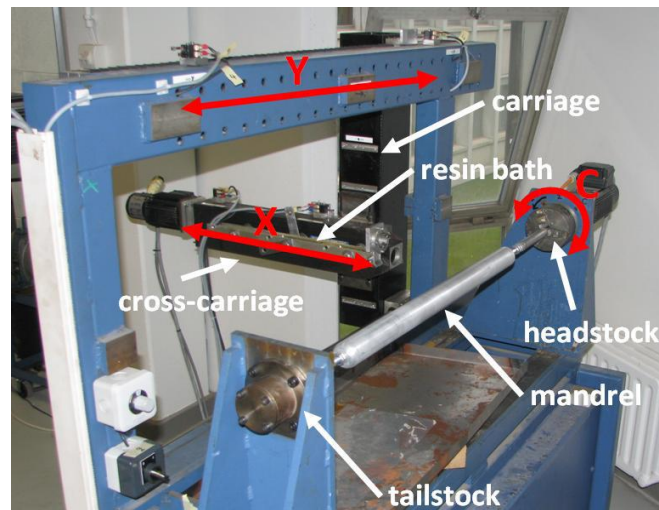
Voor de opbouw van het fietsframe wordt dus uitgegaan van ronde buizen. Vervolgens wordt gekeken hoe deze best aaneen worden geplaatst om een volledig frame te vormen. Bij het beoordelen van de productieprocessen moet ook rekening gehouden worden met een minimaal produceerbare lengte van 70 cm.

In elk van volgende processen bestaat een stappenplan dat telkens terugkomt. In eerste instantie moeten de vezels op een bepaalde manier in hun 'vorm' worden gebracht en gehouden. Het hars wordt ofwel tijdens ofwel na deze handeling toegevoegd. Na een rustperiode, die het hars nodig heeft om tot de kern van de vezels binnen te dringen, moet het stuk in de oven geplaatst worden op ongeveer 70°C tot 80°C en dit gedurende een periode van meer dan 12u. Eén stuk vergt al gauw anderhalve tot twee dagen productietijd. In 5.3 worden de lugs op soortgelijke wijze geproduceerd.

5.2.1 Wikkelen

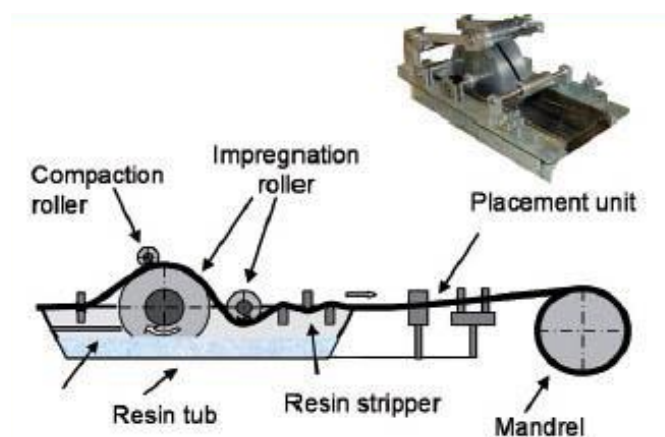
Door de aanwezigheid van een wikkelopstelling in het laboratorium, wordt het wikkelp proces (E: filament winding) als eerste onder de loep genomen. Bij het wikkelen worden de vezels in

verschillende richtingen rond een mal gewikkeld om zo een volledig bedekt oppervlak te bekomen. Om buizen te produceren met het wikkelp proces, wordt een stalen cilindrische mal tussen twee roteerbare klemmen geplaatst (zie C op Figuur 5.7). De vezel loopt door een harsbad dat ten opzichte van de mal zowel in de langs- (zie Y) als de dwarsrichting (zie X) kan bewegen. Door de rotatie van de mal en de beweging van het harsbad, wordt de vezel volgens een welbepaalde geometrie rond de mal gewikkeld. Het samenspel van rotatie en lineaire verplaatsingen wordt aangestuurd door een numeriek programma in LabView.



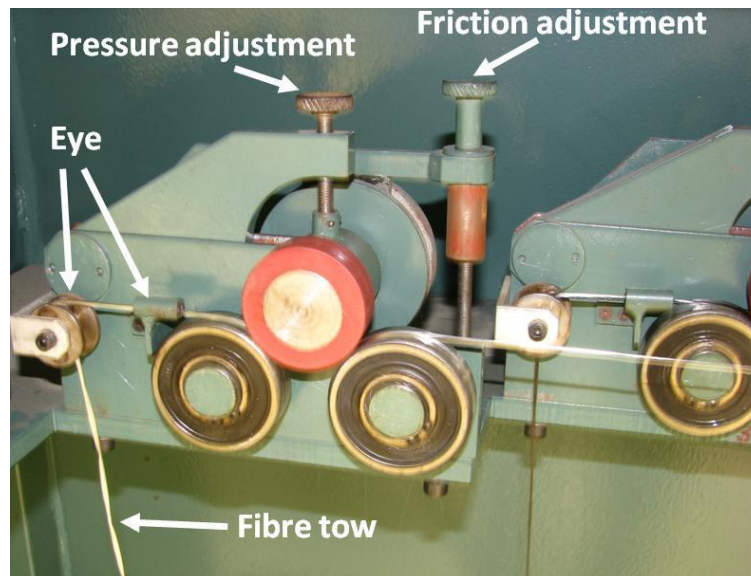
Figuur 5.7: De wikkelopstelling [26]

In het harsbad wordt de vezel doordrenkt met hars alvorens het wordt gewikkeld. Dit gebeurt volgens Figuur 5.8. De vezel wordt over een rol geleid, die deels ondergedompeld is in hars. Tijdens de rotatie van de rol blijft hars aan het oppervlak hangen. Bij voldoende spanning op de vezel, zal het hars op de rol door de vezel geduwd worden. Vervolgens wordt overtollig hars afgestroopt en gaat de vezel richting de mal.



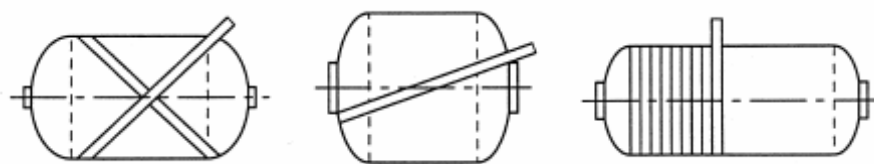
Figuur 5.8: Het harsbad

Om een zo dicht mogelijke vezelstructuur te krijgen, moeten de vezels strak aangespannen zijn tijdens het wikkelen. Dit wordt bekomen door middel van drie wielen en een veersysteem waarlangs de vezels lopen alvorens richting harsbad te gaan. De wrijvingsweerstand die de wielen op de vezels aanleggen kan worden aangepast, zie Figuur 5.9.



Figuur 5.9: Weerstandswielen [26]

De sterkte van de buizen moeten in alle richtingen voldoende zijn. Hiervoor is het nodig dat de vezels in verschillende richtingen worden gelegd. Daarom wordt gebruik gemaakt van drie wikkelformen: het kruisende, het polaire en het radiale wikkelform, Figuur 5.10. De grondlaag is telkens volledig radiaal gelegd waarna een combinatie van polaire en radiale windingen wordt gebruikt om de volgende lagen te leggen.



Figuur 5.10: Wikkelformen: kruisend, polair en radiaal

De vezels die gebruikt worden in het wikkelform, hebben een belangrijke invloed op de eigenschappen van de geproduceerde buizen. Verschillende vezelstructuren worden vergeleken. Vlasvezels zijn eindige structuren. Daarom moeten verschillende vlasvezels gecombineerd worden om een lange vezel, zoals yarn of roving, te bekomen. In volgende paragraaf zullen de korte vezels als vlasvezels benoemd worden. De lange samengestelde vezel wordt als vezel benoemd.

Een eerste vezel die gebruikt wordt is de meeste getorste vezel (yarn, zie 2.3.1). Door de cilindrische structuur van de vezels (ongeveer 0.5 mm dik), wordt bij het wikkelen een te dikke structuur bekomen waarin te veel luchtholtes worden gevormd. Dit komt door de vele kruisingen bij het kruisende model, zie Figuur 5.11. Dit probleem moet worden opgelost. Dit is mogelijk door een vezel met een vlakkere structuur te gebruiken. Bovendien dringt het hars niet door tot in het centrum van de yarn, maar blijft deze aan de oppervlakte kleven. Dit is nefast voor het vormen van een goede composiet. Ook dit probleem kan mogelijk opgelost worden door het gebruiken van een vlakkere vezel.



Figuur 5.11: Detail wikkeling getorste vezel, yarn

De tweede vezel, roving, is minder getorst en heeft dus een vlakkere structuur. Door de lagere torsie is er echter ook minder wrijving tussen de verschillende vlasvezels waardoor de treksterkte een stuk lager is. Tijdens het wikkelproces vormt dit een probleem. De benodigde spanning voor de wikkelopstelling is namelijk te hoog. Nadat het vlas door het harsbad is gegaan, is het volledig met hars doordrenkt. Dit heeft een negatief effect op de wrijving tussen de vezels. De spanning moet naar omlaag worden bijgesteld, maar het wikkelen is op deze manier moeilijk tot niet uit te voeren. Bovendien zorgt de bevochtiging van de vezel voor een extra torsie, waardoor de vezel opnieuw rond wordt en minder geschikt is voor het wikkelpatroon.

Om deze laatste problemen te verhelpen, wordt droog gewikkeld met de roving vezel. Het hars moet nadien op een andere manier aangebracht worden. De kleine torsie die nog in de draad aanwezig is, wordt gecompenseerd door de vlasdraad in tegenovergestelde richting te draaien alvorens te wikkelen. Op deze manier kan een volledig bedekt oppervlak bekomen worden. Bij dit proces komt er veel handenarbeid en langdurige concentratie aan te pas. De vezel kan niet meer in de opspanningskast geplaatst worden, omdat de spanning te hoog blijft, ook bij droog wikkelen. De rol met vlasvezel wordt gedurende het wikkelproces manueel op spanning gebracht. Eén volledige laag wikkelen duurt al snel anderhalf uur. Figuur 5.12 geeft een detailopname van het droog wikkelen weer.



Figuur 5.12: Detail droog wikkelen



Figuur 5.13: Resultaat infusie na droog wikkelen

Na het droog wikkelen wordt het hars aangebracht d.m.v. vacuïminfusie. De bevochtiging van de vezels door het hars zorgt echter voor krimp. Hierdoor wordt de oppervlakte niet meer volledig bedekt en ontstaan open ruimtes in het wikkelpatroon (Figuur 5.13). Ook de oppervlaktestructuur is niet goed, omdat een geribbeld oppervlak ontstaat door het vacuüm.

Het wikkelp proces is niet optimaal voor natuurlijk vezels zoals vlas. Hierdoor wordt van deze productiemethode afgestapt en gezocht naar andere, betere methodes.

5.2.2 Draperen

Bij het draperen worden vlasvezelmatten rond een binnenmal gelegd. Vervolgens wordt hars met behulp van infusie geïmpregneerd. De vlasmatten zijn unidirectioneel. Dit betekent dat alle vezels in één en dezelfde richting liggen. Om toch in verschillende richtingen voldoende sterke buizen te bekomen, worden de matten in verschillende richtingen gelegd.

Om een ronde buis zonder veel plooiën te bekomen, is het belangrijk dat de matten goed rond de mal worden aangetrokken. Bij een gladde mal is dit niet mogelijk door een beperkte wrijving tussen mal en mat. Een mal met een zekere ruwheid is nodig. Dezelfde ruwheid zorgt echter voor problemen bij het verwijderen van de binnenmal uit de buis. Het hars bindt sterk met ruwe oppervlakken. Een mal uit polyurethaan (PUR) is hiervoor een oplossing, zie Figuur 5.14. Dit materiaal laat toe een mal met geometrie naar keuze te produceren. Het is voldoende ruw om de matten te kunnen aanspannen en het kan achteraf worden verwijderd door deze uit de buis te snijden.

Bij vacuüminfusie wordt gebruikt gemaakt van een drukverschil om een vloeistofstroming op te wekken. Eerst worden de vlasmatten rond de mal gedrapeerd. Vervolgens wordt rond deze matten een scheurweefsel (E: peelply) aangebracht. Hier wordt een verdeelnet rond geplaatst. Het verdeelnet zorgt voor een uniforme verdeling van het hars over de volledige omtrek van de buis. De lucht die nog aanwezig is, zal door dit net beter kunnen ontsnappen. Het scheurweefsel is nodig om het verdeelnet achteraf te kunnen verwijderen. Het is belangrijk het verdeelnet niet over de volledige omtrek te plaatsen, maar enkel stroken aan te brengen. Deze manier van werken vereenvoudigt het verwijderen van de peelply en het verdeelnet. Rond het geheel wordt een vacuümsak gelegd. De zak is luchtdicht op twee openingen na: de ingang die wordt verbonden met een hars bad en de uitgang die aan een vacuümpomp wordt aangesloten. Dit geheel wordt weergegeven in Figuur 5.15.



Figuur 5.14: Cilindrische binnenmal uit polyurethaan



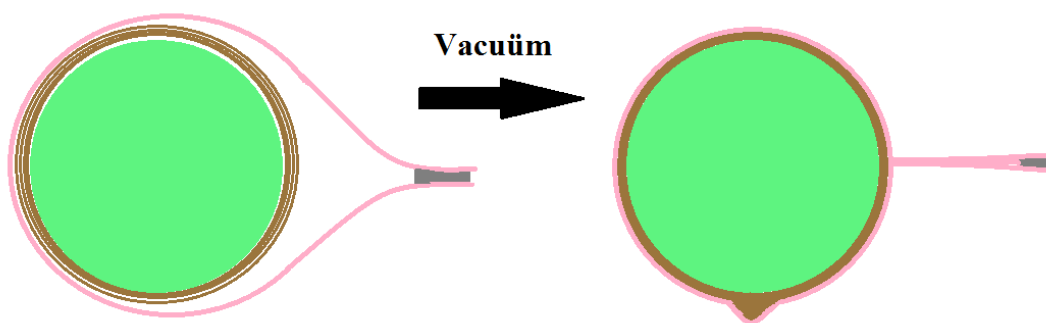
Figuur 5.15: Vacuüm infusieproces

Bij draperen met droge matten blijven rimpels en lucht in het resultaat achter. Figuur 5.16 geeft een schematische voorstelling van de rimpelcreatie nadat vacuüm wordt aangebracht. Als de matten, voor het draperen met hars worden ingesmeerd, blijven ze beter aan de mal plakken, waardoor deze harder kunnen worden aangespannen en minder rimpels veroorzaken

na vacuüm. Het resulteert echter in een buis met meer luchtpockets dan bij droge matten. Dit komt omdat de luchtbellens die aanwezig zijn na het draperen, bij infusie door het aanwezige hars worden omgeven en vastgehouden.

De luchtbellens die echter bij de droge test aanwezig zijn, hebben een andere oorsprong. PUR is een zeer poreus materiaal en bevat dus veel lucht. Na de infusie blijft dit materiaal lucht afgeven aan de matten, waardoor er steeds luchtbellens in de buizen terechtkomen. Als de matten met een dun laagje latex worden ingewreven, kan deze lucht niet meer aan de matten worden afgegeven. De matten blijven bovendien voldoende aan de latex kleven, waardoor ze nog steeds strak kunnen worden aangespannen.

Ook op deze manier worden de aanwezige plooien echter nooit weggewerkt, waardoor een andere oplossing moet worden gevonden.



Figuur 5.16: Schematische voorstelling rimpelcreatie bij vacuümproces

5.2.3 Tegenmal met binnendruk en infusie

Een nieuw idee om een goede buitenafwerking van de buizen te bekomen, bestaat erin een buitenmal te gebruiken. In de mal worden gedrapeerde matten intern onder druk gezet met behulp van een blaasbalg. Op die manier worden de matten tegen de buitenmal gespannen. Vervolgens wordt het geheel geïnfuseerd.

De buitenmal bestaat uit twee delen met elk een afdruk van een halve cilinder. Deze delen worden zodanig op elkaar vastgezet dat binnenin een luchtdichte holle cilinder wordt gevormd. Er zijn drie aansluitingen naar buiten: twee voor infusie en een voor het op druk zetten van de blaasbalg. Figuur 5.17 geeft een testopstelling met aluminium matten weer. Deze opstelling geeft bevredigende resultaten, zie Figuur 5.18.



Figuur 5.17: Aluminium buitenmal met blaasbalg en infusie



Figuur 5.18: Goed resultaat uit de aluminium mal

Voor een goede afwerking, afmeting en afdichting, is het gebruik van een stalen of aluminium mal de beste keuze. Bij de afmetingen, nodig om buizen voor een fiets te maken, moet deze mal echter besteld worden bij een externe firma. Deze ingreep zou te kostelijk zijn en teveel tijd in beslag nemen.

Om die redenen is er geopteerd om een eigen mal te produceren uit glasvezel en epoxyhars. De afdruk wordt bekomen door een PVC-buis doormidden te snijden, in twee halve buizen. Deze worden op een glazen plaat gekleefd, waarna met de hand lay-up techniek, glasvezelmatten met epoxyhars worden aangebracht (Figuur 5.19).



Figuur 5.19: Glasvezelmal met pvc-afdruk

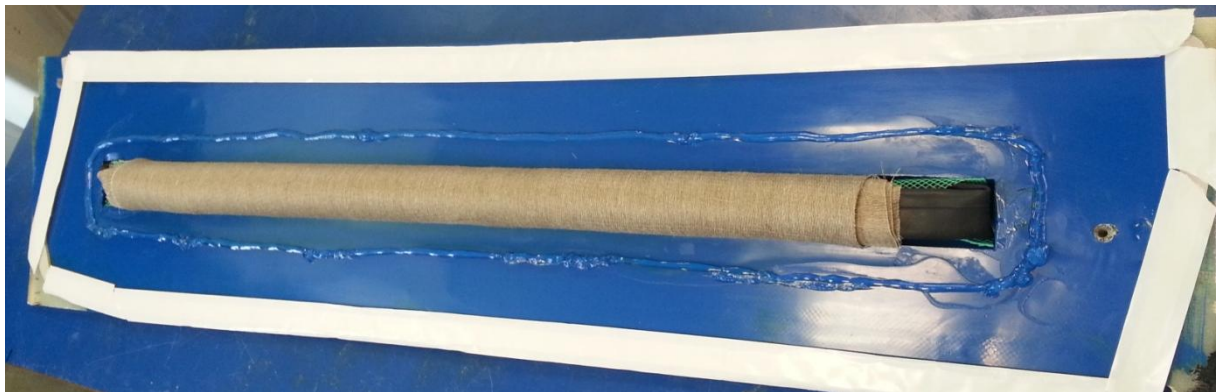


Figuur 5.20: Glasvezelmal met polyester (blauw) afwerking

De afwerking is niet voldoende waardoor een nieuwe mal moet worden gemaakt. De halve PVC-buizen worden nu eerst met polyester ingesmeerd, waarna opnieuw glasvezelmatten met epoxyhars worden aangebracht. De afwerking is hierbij merkkelijk beter, zie Figuur 5.20.

De blaasbalg wordt in normale omstandigheden gemaakt uit silicone. Dit vereist echter een andere mal en op maat gemaakte aansluitingen, wat opnieuw tijd en geld zou kosten. Er wordt gekozen voor een binnenband van een fiets die op maat wordt afgesneden. De uiteinden worden dicht geplakt en het ventiel wordt als aansluiting naar buiten gebruikt.

De binnenband wordt licht onder druk gezet tot de juiste diameter wordt gehaald. Daarna worden de matten rond de band gedrapeerd. De sterkte moet in alle richtingen voldoende zijn. De matten worden dus in verschillende richtingen gedrapeerd. Er wordt gekozen om de matten in de 90°- en 0°-richting te draperen. De 90°-richting zorgt ervoor dat de matten gemakkelijk rond de band kunnen gedraaid worden. De andere richtingen rafelen onmiddellijk uit. De keuze voor de 0°-richting werd gemaakt omwille van besparing op materiaal. Een 45°-richting zou teveel afval met zich meebrengen, wat niet gewenst is vermits de productiemethodes veelal testen zijn.



Figuur 5.21: Gedrapeerde binnenband in mal

De afdichting van de mal wordt het best uitgevoerd door middel van sealenttape. Ook andere afdichtingen, zoals een rubberen mat en siliconelijm werden getest. Ook de optie om geen afdichting te gebruiken werd uitgevoerd. Enkel de afdichting met sealenttape zorgt voor een volledig vacuüm in de mal. De afdichtingen worden aan de rand van een malhelft gelegd, waarna de ander helft er wordt op gedrukt. Op de mal worden meerdere klemmen geplaatst zodat de luchtdichtheid wordt behouden gedurende het infusieproces (Figuur 5.22). Er wordt geadviseerd geen gaten in de mal te boren (enkel 2 gaten voor het centreren van de mallen t.o.v. elkaar) om de mallen samen te houden. Elke kleine onzuiverheid is voldoende de vacuümtoestand te bedreigen.



Figuur 5.22: Infusieproces buizen in glasvezelmal

Deze methode geeft de beste resultaten. De buitenkant heeft een goede afwerking en er is nauwelijks lucht in de buis overgebleven. Deze methode wordt gekozen om de buizen te produceren. Een nadeel aan de glasvezelmal is dat, na verloop van tijd (na een tiental gebruiksbeurten), de mal sterk vervormd en stukjes uit het polyester loskomen. Vooral het vervormen van de mallen kan voor problemen zorgen, zoals het onrecht zijn van de buizen. Een mogelijke oplossing hiervoor is het verwerken van stalen staven in de glasvezel tijdens de productie van de mallen. Op die manier zullen de mallen minder onderhevig zijn aan vervorming.

5.3 Lugs

De buizen moeten op de juiste manier verbonden worden om een frame te vormen. Hoewel in 5.1 werd gezegd dat er lugs zouden gemaakt worden, zijn ook andere mogelijkheden bekeken.

Eén manier bestaat erin de buizen onder de juiste geometrie aan elkaar te lijmen. Als lijm wordt hars gemixt met korte stukken vlasvezel. Dit mengsel wordt aan de verbindingen gesmeerd waarna het geheel in de oven uithardt, zie Figuur 5.23.

De hoekpunten moeten stevig zijn om de krachten te kunnen overbrengen. De lijm is hiervoor op zichzelf niet voldoende. Er worden nog vlasmatten rondom de hoeken gelegd, waarna deze eveneens via infusie worden geïmpregneerd. Het resultaat is een heel stevige, zware verbinding, doch de kwaliteit van de buizen is verminderd door de vele afwisselingen in omstandigheden, zoals het meerdere malen opwarmen en laten afkoelen. Verder wordt er veel materiaal gebruikt, waardoor het gewicht snel oploopt. Het resultaat staat in Figuur 5.24.

De verbinding van de buizen kan ook bekomen worden door prepreg matten rechtstreeks over de buizen te draperen, zie Figuur 5.25. Het is moeilijk de juiste omgevingscondities te creëren om de prepreg te laten uitharden, met veel luchtholtes als resultaat. Op die manier is er ook geen mogelijkheid meer om later biohars te gebruiken.



Figuur 5.23: Gelijmde buizen



Figuur 5.24: Volledig gelijmde buizen



Figuur 5.25: Verbinding door prepreg matten

Om de buizen te verbinden kunnen ook aparte verbindingstukken of lugs worden gefabriceerd. De lugs moeten ervoor zorgen dat de buizen onder de juiste geometrie kunnen worden verbonden. Ze moeten stevig zijn om de krachten te kunnen opvangen en de buizen moeten zo goed mogelijk op de lugs aansluiten. De buizen hebben een buitendiameter van veertig millimeter waardoor bij de lugs een constante binnendiameter genomen wordt. Om de juiste binnendiameter te bekomen, worden mallen uit PUR gemaakt. Net zoals bij de buizen, is een laag latex nodig als bescherming tegen extra lucht uit de mal.



Figuur 5.26: Mal van de lug ingesmeerd met latex

De hoeken van het frame bepalen de vorm van de lugs. De verschillende PUR buizen worden onder de juiste hoek aan elkaar gelijmd met secundelijm. Vervolgens wordt de hele mal met latex ingewreven. Om de vlasmatten te draperen rond de mal, kunnen er verschillende methoden gebruikt worden.

De eerste methode is analoog aan het wikkelen van een steunverband bij een gewricht. Er wordt een lange smalle reep vlasmат rond de mal gewikkeld zodat elke plek min of meer evenveel lagen telt en de vezels overal in verschillende richtingen liggen. De repen worden vastgehouden door middel van vlas roving, zie Figuur 5.27.



Figuur 5.27: Gedrapeerde mal van een lug

Deze mal wordt m.b.v. vacuüminfusie met hars geïmpregneerd. Hiervoor wordt rondom de vlasmatten scheurweefsel gelegd, met daarboven een verdeelnet. Het geheel wordt in een vacuümzak geplaatst. Om een uniforme verdeling van het hars te krijgen, zijn twee aansluitingen niet voldoende. Afhankelijk van de lug, worden drie of vier aansluitingen gekozen, telkens aan de uiteinden van de mal, zoals in Figuur 5.28.



Figuur 5.28: Gedrapeerde lug in vacuümzak

De lugs die met deze methode zijn gemaakt, bevatten weinig lucht. Er blijven nog enkele plooien aan het buitenoppervlak zichtbaar, maar het binnenoppervlak is glad en de diameter is constant. Dit is de belangrijkste voorwaarde voor de lugs.



Figuur 5.29: Resultaat gedrapeerde lug

Bij een andere mogelijke methode wordt gebruik gemaakt van *prepreg* vlasmatten. Dit materiaal is sterk verwerkbaar. Er blijft echter nog veel lucht in de structuur over, waardoor de sterkte erg vermindert. Ook kunnen rimpels op deze manier niet voorkomen worden.

Ten slotte wordt bij de lugs onderzocht of nat draperen, gevolgd door infusie, goede resultaten oplevert. Dit geeft echter opnieuw meer luchtbelletjes. De oorzaak is analoog als bij de buizen.

5.4 Samenbouw

De gedrapeerde lugs geven de beste resultaten en worden gebruikt voor het frame. De buizen worden gemaakt met behulp van de glasvezelmal. Om een driehoekvormig frame te maken zijn, drie buizen en drie lugs nodig, afgebeeld in Figuur 5.30.

De buizen en lugs worden samengelijmd met epoxylijm. De contactoppervlakken worden opgeschuurd om een beter contact te krijgen. De afgewerkte driehoek wordt weergegeven in Figuur 5.31.



Figuur 5.30: Buizen en lugs voor samenbouw



Figuur 5.31: Afgewerkt frame, zonder achtervork

Hoofdstuk 6

Testen

In dit hoofdstuk worden verschillende testen uitgevoerd op het geproduceerde materiaal. In een frequentietest worden de eigenmodes met bijhorende eigenfrequenties bepaald. Deze test wordt ook nagebootst in een numerieke simulatie in Abaqus. Het model dat gebruikt is, wordt ook uitgelegd. Voor deze test worden 3 buizen gemaakt uit verschillend materiaal m.b.v. de malmethode uit 5.2.3.

De buizen uit bovenstaande frequentietest worden vervolgens onderworpen aan een driepuntsbuigproef. De stijfheidmodulus onder buiging kan op die manier worden bepaald en onderling vergeleken.

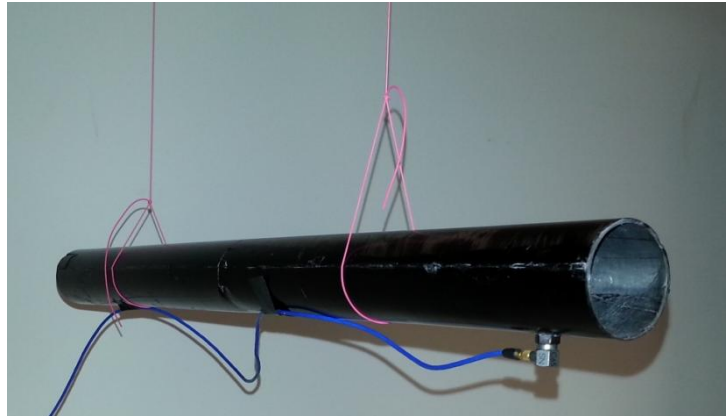
In een laatste test wordt het frame uit 5.4 onderworpen aan enkele krachten en momenten vergelijkbaar met de belasting die een fietser op een fiets uitoefent.

6.1 Frequentietesten

6.1.1 Reële eigenfrequenties

De eigenschappen van een vlasvezelbuis worden vergeleken met buizen gemaakt uit glasvezel en carbonvezel. Om een zo goed mogelijke vergelijking te maken, worden alle buizen opgebouwd uit tien lagen en hebben ze een diameter van 40 mm en een lengte van 48 cm.

De eigenfrequenties van de buis geven een goede indicatie van de stijfheid. Om de eigenfrequenties te testen, wordt gebruik gemaakt van de natuurlijke respons op impact. De buis wordt aan twee elastieken opgehangen, zodat het geheel buis-elastieken trilt aan een frequentie tussen 1 en 2 Hz. Deze lage frequentie zorgt ervoor dat geen interferentie ontstaat met de eigenfrequentie van de buis.



Figuur 6.1: Testopstelling frequentiemeting

Op de buis wordt een accelerometer bevestigd. Deze meter registreert de verticale acceleratie van de buis. Om de buis te impacteren wordt gebruik gemaakt van een hamer met plastic kop. In deze hamer zit eveneens een krachtsensor ingebouwd, zodat de grootte van de impact wordt gemeten.



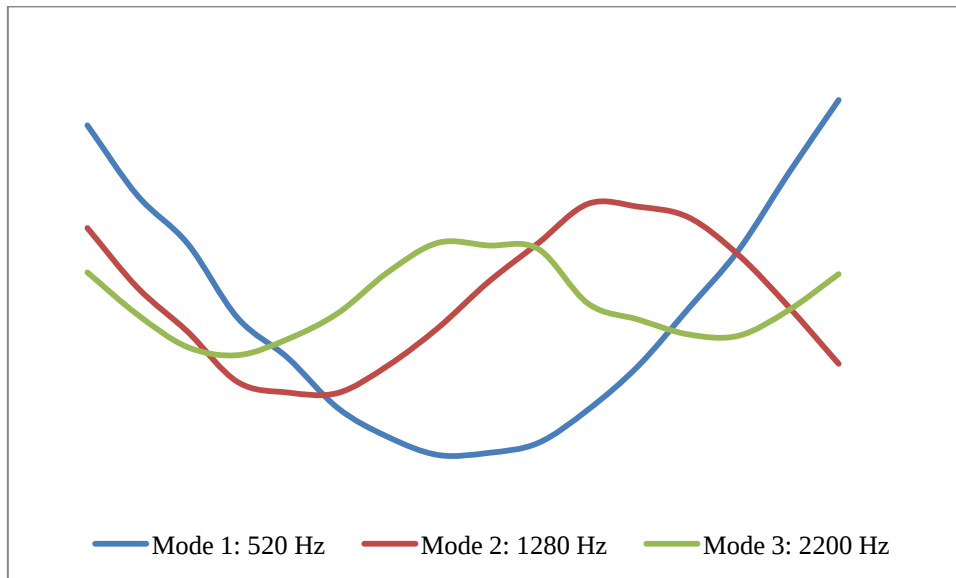
Figuur 6.2: Hamer frequentietest

Om de eigenfrequenties en bijhorende eigenwaarden te kennen, wordt op verschillende plaatsen van de buis met de hamer geslagen. De accelerometer blijft telkens op dezelfde plaats de beweging meten. In deze test wordt om de 3 cm geslagen. De accelerometer wordt bevestigd ter hoogte van het eerste slagpunt.

Als er op één van de punten wordt geslagen, zal de buis zich met een exponentieel uitstervend trillingspatroon terug richting oorspronkelijke staat bewegen. Uit dit patroon wordt de frequentieresponsie bepaald. Door dit voor alle punten van de buis te herhalen kan de eigenfrequentie en bijhorende eigenmode bepaald worden. De eigenmode is de vorm van de beweging, horend bij de eigenfrequentie.

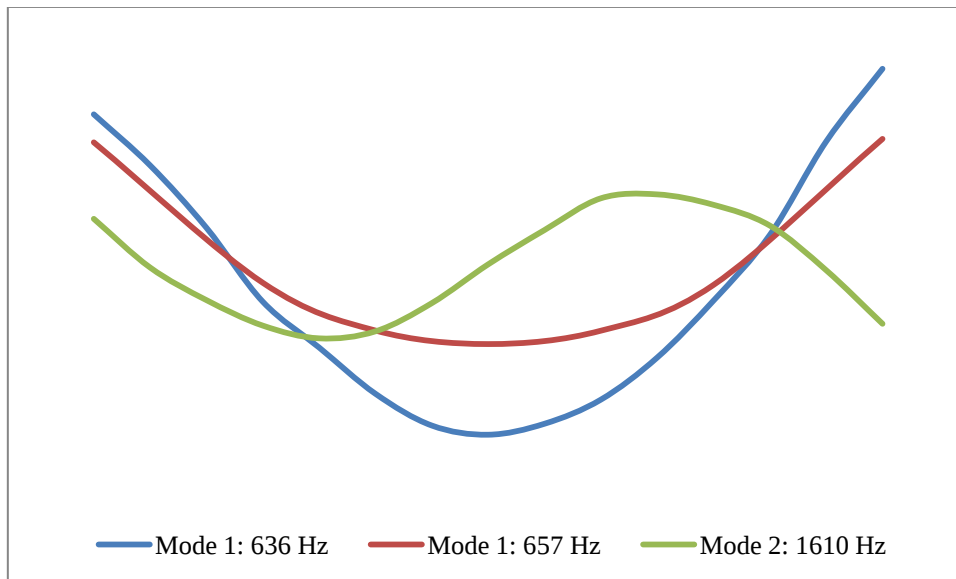
Het labviewprogramma geeft de amplitude, het imaginaire en het reële deel van de frequentieresponsie. Het teken van het imaginaire deel en de amplitude geven samen de mode van elke eigenfrequentie. De eigenfrequenties liggen op de pieken van het imaginaire deel.

Voor de vlasvezelbuis worden de eerste drie eigenfrequenties bepaald. De 3^{de} eigenfrequentie ligt bij 2200 Hz. De installatie geeft reeds veel ruis bij deze hoge frequenties, maar de eigenfrequentie is nog duidelijk zichtbaar.



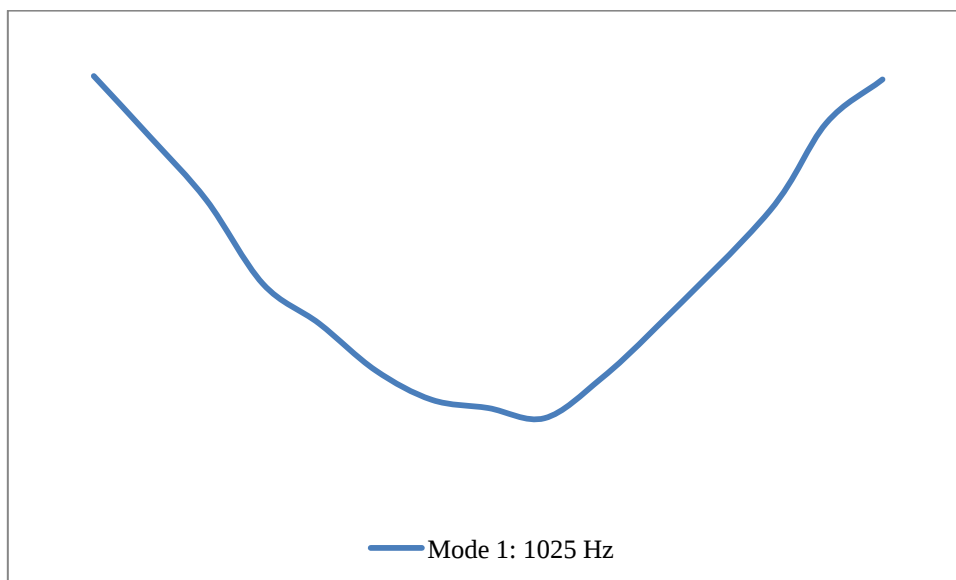
Figuur 6.3: Eigenmodes vlasvezelbuis

Bij de glasvezelbuis zijn er verschillende eigenfrequenties, afhankelijk van het vlak waarin wordt gemeten. Dit wijst op een asymmetrie. De eigenmodes hebben beiden 2 knopen, waardoor ze duidelijk een eerste mode zijn.

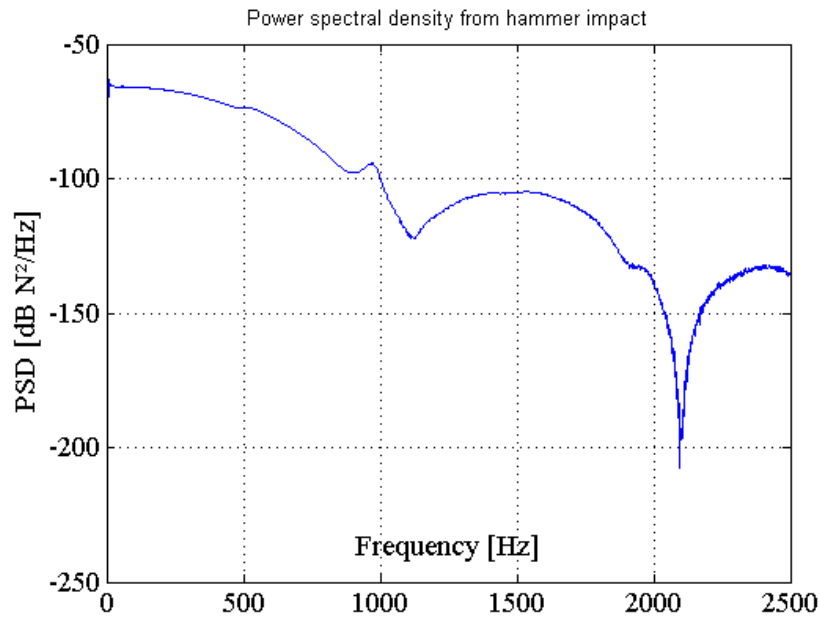


Figuur 6.4: Eigenmodes glasvezelbuis

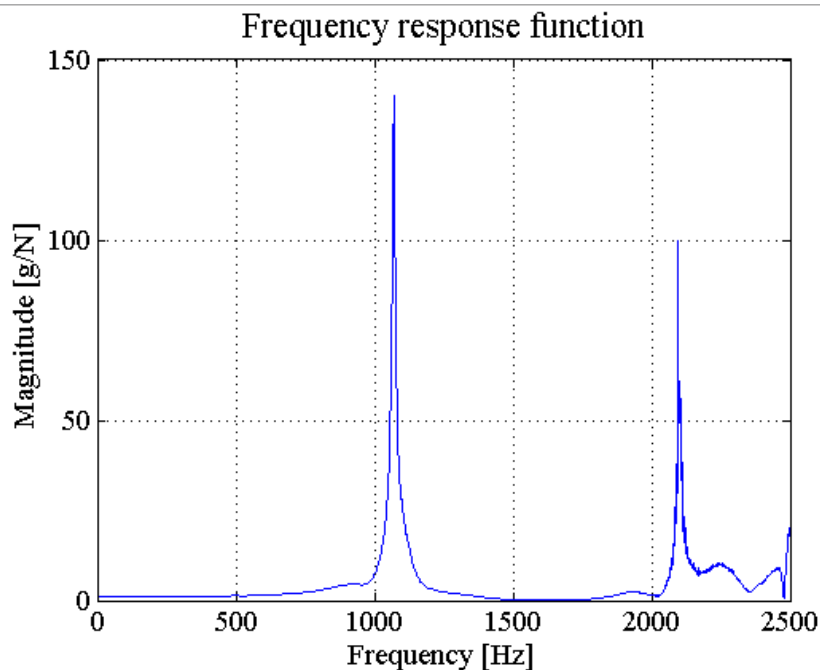
Bij de carbonvezelbuis ligt de 2^{de} eigenfrequentie zeker boven de 2000 Hz. Bij de beschikbare instrumentatie is er veel ruis boven 2000 Hz, waardoor de tweede eigenfrequentie niet te bepalen is. De ruis boven 2000 Hz is te wijten aan te weinig impactenergie van de plasticen kop van de hamer. Mocht een metalen kop gebruikt worden, kan de energie van signalen boven 2000 Hz hoger zijn. Dit is duidelijk te zien in Figuur 6.6, waar de energiedensiteit rond 2000 Hz sterk afneemt. Van de eigenfrequenties uit Figuur 6.7 is enkel de eerste betrouwbaar.



Figuur 6.5: Eigenmode carbonvezelbuis



Figuur 6.6: Energie densiteit van de hamer op de buis



Figuur 6.7: Frequentieresponsie na impact op de carbonbuis

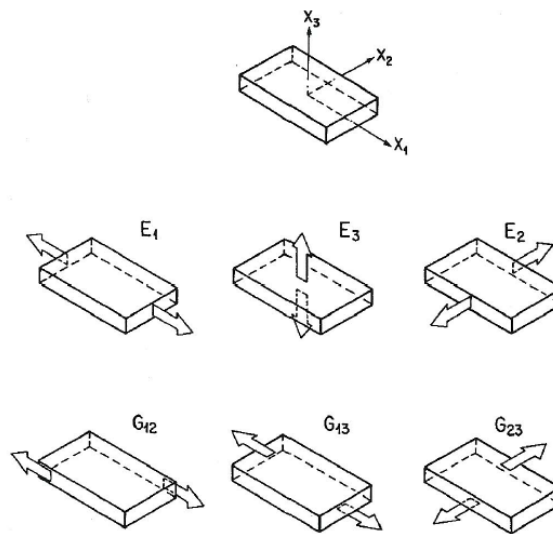
De vlasvezelbuis heeft de laagste eigenfrequenties van de drie buizen. Hieruit volgt niet onmiddellijk dat ze de laagste stijfheid heeft. De massa speelt ook een rol. De eigenfrequentie van een buis is evenredig met de verhouding van de stijfheid op de massa. In Tabel 6.3 zijn de massa's weergegeven. Uit deze veronderstelling blijkt dat de glasvezelbuis tweemaal stijver is dan de carbonbuis en de vlasvezelbuis, die beide in dezelfde grootte orde liggen. Dit is niet wat zou verwacht worden: koolstofcomposiet is normaal de stijfste composiet.

6.1.2 Numerieke Simulatie

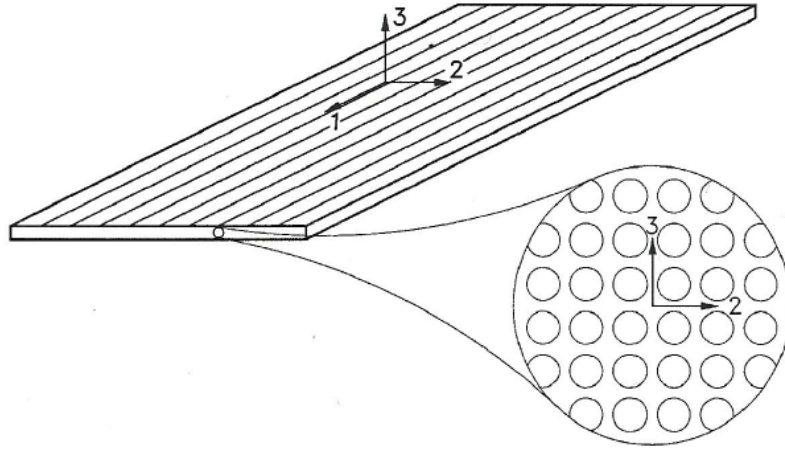
Voor numerieke simulaties in Abaqus moeten de materiaaleigenschappen ingegeven worden. Tijdens de productie van componenten zal voornamelijk het UD-vlasvezel materiaal met sizing worden gebruikt. Enkel de eigenschappen uit Hoofdstuk 4 van dit composiet zijn van belang. Samenvattend zijn dit:

$$\begin{aligned} E_{11} &= 23,74 \text{ GPa} \\ v_{12} &= 0,36 \\ E_{22} &= 5.51 \text{ GPa} \\ v_{21} &= 0,084 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Maar deze waarden zijn niet voldoende om een model op te bouwen in Abaqus. De noodzakelijke constanten zijn: $E_{11}, E_{22}, E_{33}, v_{12}, v_{13}, v_{23}, G_{12}, G_{13}$ en G_{23} . De G 's stellen de glijdingsmoduli voor. In Figuur 6.8 zijn de stijfheidseigenschappen van een orthotroop materiaal schematisch voorgesteld (i.e. materialen waar men drie onderling loodrechte symmetrievlakken kan vinden). In het geval van UD-composieten wordt gesproken van transversaal isotrope materialen, i.e. een bijzondere klasse van orthotrope materialen (zie Figuur 6.9).



Figuur 6.8: Schematische voorstelling van de stijfheidseigenschappen voor een orthotroop materiaal [25]



Figuur 6.9: Transversale isotropie in een unidirectioneel vezelversterkt composiet [25]

Voor deze materialen en dus ook voor het UD-vlasvezel composiet, zijn volgende correlaties geldig:

$$\begin{aligned}
 E_{22} &= E_{33} \\
 G_{12} &= G_{13} \\
 \nu_{12} &= \nu_{13} \\
 \nu_{23} &= \nu_{32} \\
 G_{23} &= \frac{E_{22}}{2 \cdot (1 + \nu_{23})}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Dit neemt niet weg dat de glijdingsmoduli G_{12} en G_{23} niet gekend zijn. G_{23} kan snel bepaald worden met behulp van ν_{23} . Deze Poisson coëfficiënt kan benaderd worden door de Poisson coëfficiënt van de matrix: dit is $\nu_{23} = 0,3$.

G_{12} volgt normalerwijze uit een trekproef op een 45° -richting UD-composiet. Deze proef is niet uitgevoerd, dus deze waarde ontbreekt. Omdat de eigenschappen van prepreg UD-vlasvezel niet zoveel verschillen van de eigen materiaaleigenschappen en omdat het praktisch om hetzelfde materiaal gaat, worden de waarden uit [3] genomen voor simulaties.

Dan volgt voor alle vereiste stijfheidseigenschappen:

$$\begin{aligned}
 E_{11} &= 27.20 \text{ GPa} \\
 E_{22} &= E_{33} = 5.51 \text{ GPa} \\
 \nu_{12} &= \nu_{13} = 0.36 \\
 \nu_{23} &= 0.3 \\
 G_{12} &= G_{13} = 2.322 \text{ GPa} \\
 G_{23} &= 2.119 \text{ GPa}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

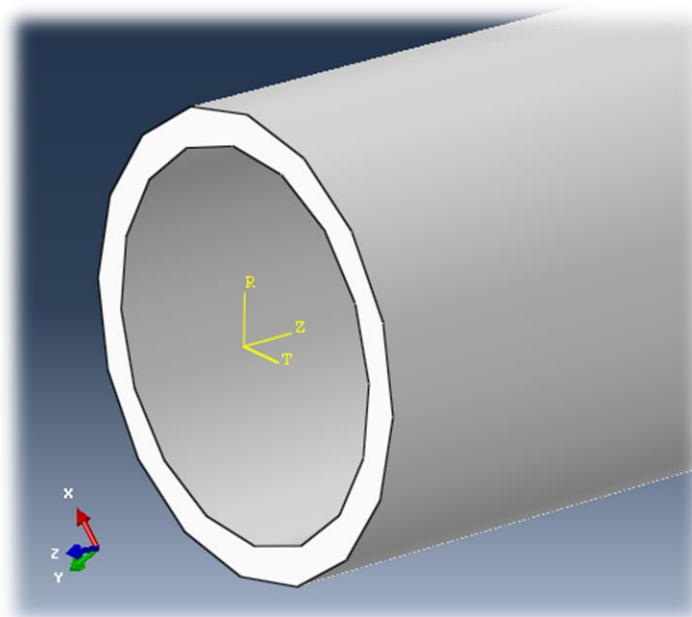
De buizen en lugs in Abaqus worden als solids behandeld. De elementen van de mesh zijn hex-vormig en van het type: C3D20R. Er worden 6800 elementen gegenereerd voor de buizen

van 50 cm lang en 3 mm dik. De mesh-elementen hebben een volume van ongeveer 27 mm³. Een fijnere mesh is onmogelijk door de beperkte rekenkracht van de computer.

Om de frequentietest te simuleren, wordt enkel de vlasvezelbuis gebruikt. De eigenschappen van de andere materialen zijn niet ter beschikking.

De buis wordt, zoals in werkelijkheid, opgebouwd uit 10 lagen UD-vlasvezelmateriaal met afwisselend een 0°-laag en 90°-laag. De uitwendige diameter is 40 mm met een dikte van 3.14 mm. Omdat voor een buis gewerkt wordt met een cilindrisch assenstelsel, moeten de stijfheidseigenschappen getransformeerd worden in Abaqus. In Figuur 6.10 staat het euclidisch assenstelsel naast het cilindrisch assenstelsel afgebeeld. De waarden worden voor een transformatie van xyz -assenstelsel naar $r\theta z$ -assenstelsel:

$$\begin{aligned}
 E_{zz} &= 27.20 \text{ GPa} \\
 E_{rr} &= E_{\theta\theta} = 5.51 \text{ GPa} \\
 \nu_{z\theta} &= \nu_{zr} = 0.36 \\
 \nu_{\theta r} &= 0.3 \\
 G_{z\theta} &= G_{zr} = 2.322 \text{ GPa} \\
 G_{\theta r} &= 2.119 \text{ GPa}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

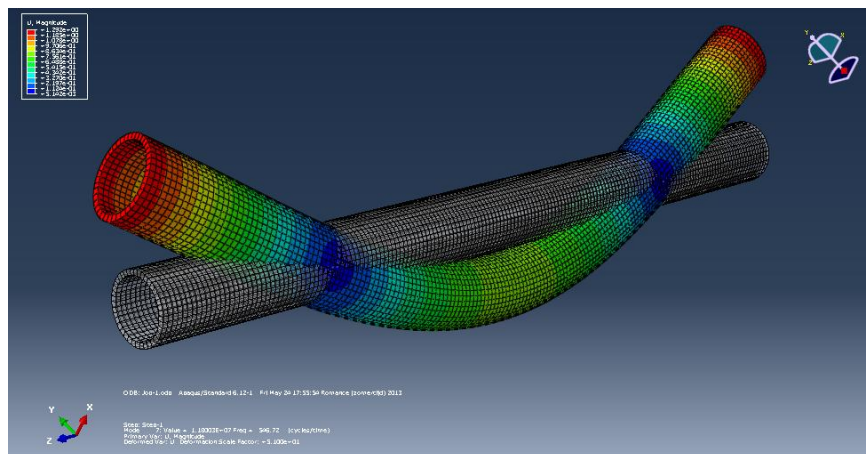


Figuur 6.10: Euclidisch- en cilindrisch assenstelsel

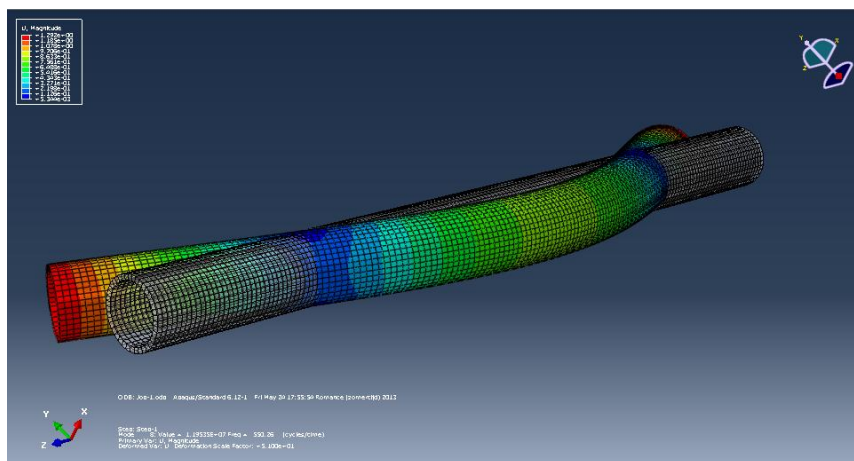
Deze opgegeven waarden en afmetingen worden in deze simulatie gebruikt. De resultaten voor de gesimuleerde eigenfrequenties zijn:

Tabel 6.1: Gesimuleerde eigenfrequenties

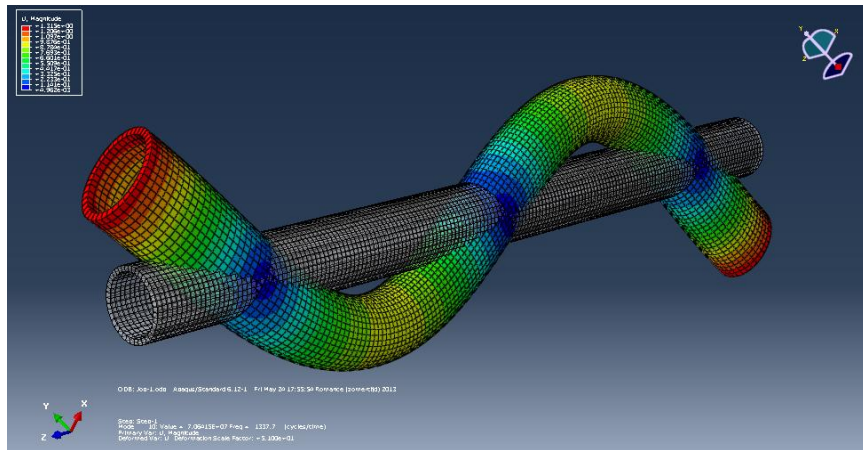
1 ^{ste} modi [Hz]	546
	550
2 ^{de} modi [Hz]	1338
	1346
3 ^{de} modi [Hz]	2285
	2298



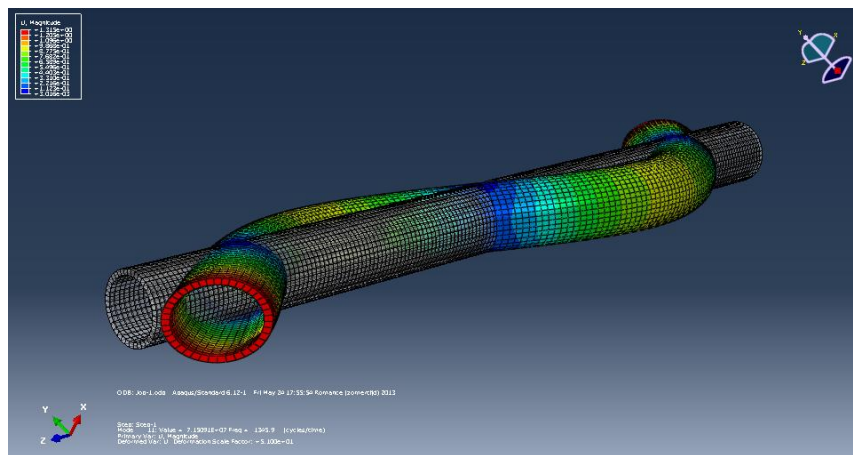
Figuur 6.11: 1ste mode: 546 Hz



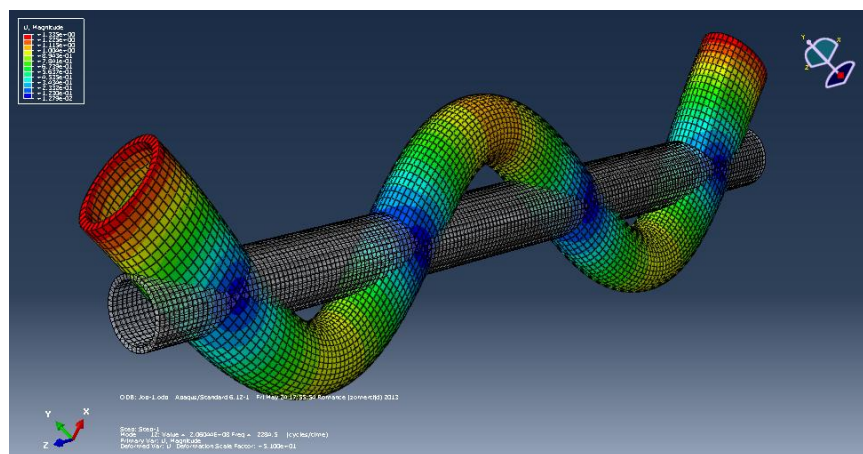
Figuur 6.12: 1ste mode: 550 Hz



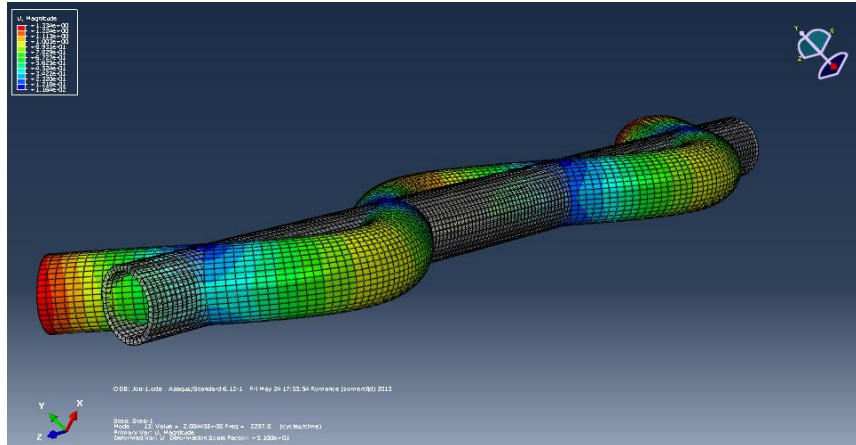
Figuur 6.13: 2de mode: 1338 Hz



Figuur 6.14: 2de mode: 1346 Hz



Figuur 6.15: 3de mode: 2285 Hz



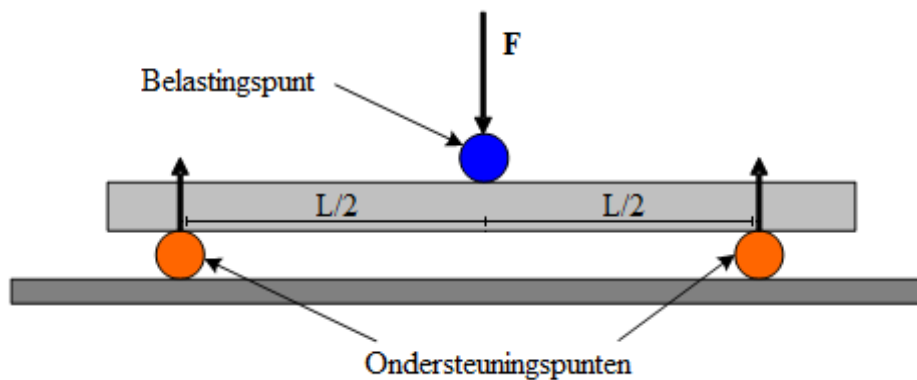
Figuur 6.16: 3de mode: 2298 Hz

De numeriek berekende eigenmodes komen volledig overeen met de gemeten waarden. De numeriek berekende frequenties liggen iets hoger dan de gemeten waarden. Dit komt door de imperfecties die in realiteit onvermijdelijk zijn. De grootteordes van de verschillende frequenties zijn wel aanvaardbaar, waardoor de numerieke simulatie als een goede benadering kan worden genomen.

Alle modes hebben in abaqus twee verschillende bijhorende eigenfrequenties, afhankelijk van de richting waarin wordt gekeken. Dit levert niet het verwachte resultaat aangezien de buis volledig symmetrisch wordt gesimuleerd.

6.2 Driepuntsbuigproef

De driepuntsbuigproef voorziet waarden voor de stijfheid E_f voor buiging (i.e. de stijfheid van de buizen), de buispanning σ_f , de rek ε_f onder buigbelasting en daaruit ook de trek-rek curve onder buigbelasting. Een voordeel van deze test is dat ze gemakkelijk uit te voeren valt. Er zijn ook een aantal nadelen: de resultaten zijn gevoelig aan de geometrie van de test- en belastingsstukken. Het interpreteren van de resultaten is niet altijd eenvoudig. Het materiaal wordt aan de bovenzijde belast in druk, en aan de onderzijde belast in trek. Als de elasticiteitsmodulus E verschillend is in trek en druk, of het materiaal gedraagt zich niet lineair elastisch, dan zijn de resultaten van buigproeven moeilijk te interpreteren.

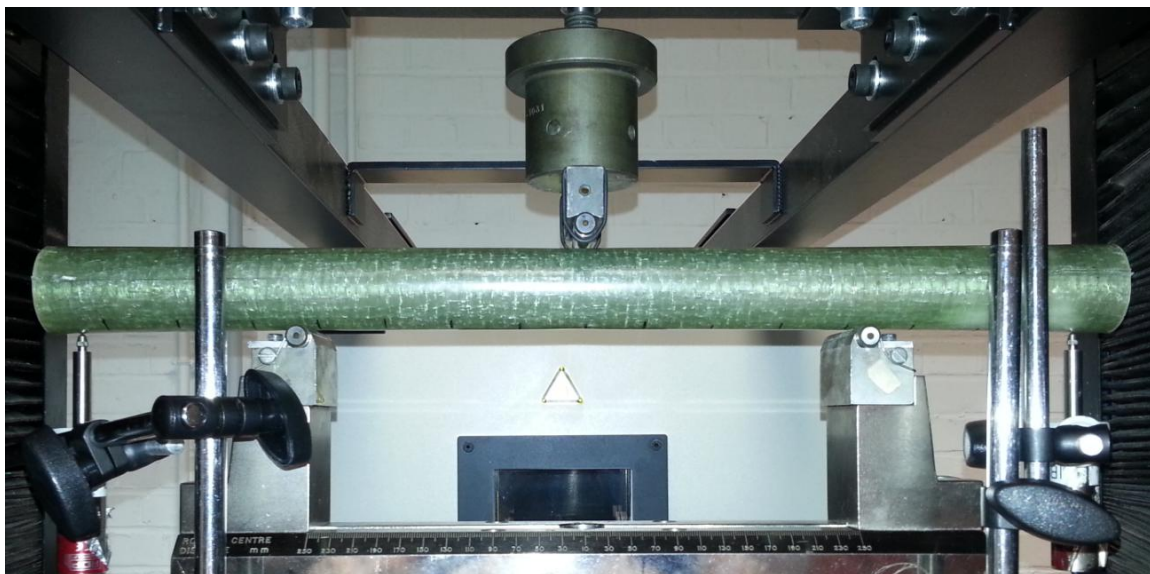


Figuur 6.17: Schematische voorstelling driepuntsbuigproef

De testen worden uitgevoerd op dezelfde buizen als in 6.1, en volgens de internationale ASTM normen. Specifiek voor een driepuntsbuigproef is dit:

ASTM D790-02: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials [19].

Zoals de trekproeven uit Hoofdstuk 4 worden deze testen uitgevoerd op de Instron 5800r proefopstelling. De buizen liggen op twee steunpunten en worden belast door één punt in het midden. De ondersteunings- en belastingspunten zijn cilindervormig (zie Figuur 6.17 en Figuur 6.18). De verplaatsingsnelheid van het belastingspunt staat op 2 mm/min ingesteld.



Figuur 6.18: Opstelling driepuntsbuigproef

De uitwijkingen aan de linker- en rechterkant worden opgemeten met lvd't's. Ook de verplaatsing en de kracht op het belastingspunt worden uitgelezen in een LabView programma.

De op te lossen vergelijkingen volgen uit het structureel gedrag van een balk op twee steunpunten met een puntlast. De balk stelt hier een holle cilinder voor, m.a.w. een buis. Hieronder volgen de vergelijkingen [25]:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{F \cdot L}{4} \\
 I_{yy} &= \frac{\pi}{4} \cdot (r^4 - (r - t)^4) \\
 \sigma_f &= \frac{M \cdot r}{I_{yy}} \\
 E_f &= \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot u \cdot I_{yy}} \\
 \varepsilon_f &= \frac{\sigma_f}{E_f}
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Met M het moment waar de belasting aangrijpt, I_{yy} het traagheidsmoment om de y-as van een cilindervormige doorsnede, r de uitwendige straal, t de dikte van de buizen en u de verplaatsing van de puntlast.

De gemiddelde diktes van de buizen staan weergegeven in Tabel 6.2. Het verschil in dikte heeft als oorzaak dat er gekozen werd om voor elke soort buis hetzelfde aantal lagen en dezelfde stapeling te gebruiken, ongeacht de dikte van de lagen. Het glasvezel UD-materiaal is beduidend dikker. De verschillende diktes hebben een invloed op de proeven. Tijdens de test worden de buizen na verloop van tijd ingedeukt door het belastingspunt (zie Figuur 6.21, Figuur 6.22 en Figuur 6.23). Vanaf dat moment zijn de metingen nutteloos. Hoe dikker de buiswand, hoe beter de buis weerstaat aan de indeuking. Er kan gesteld worden dat een driepuntsbuigproef op holle buizen niet de ideale manier van testen is. Doch zullen de resultaten de lezer niet onthouden worden.

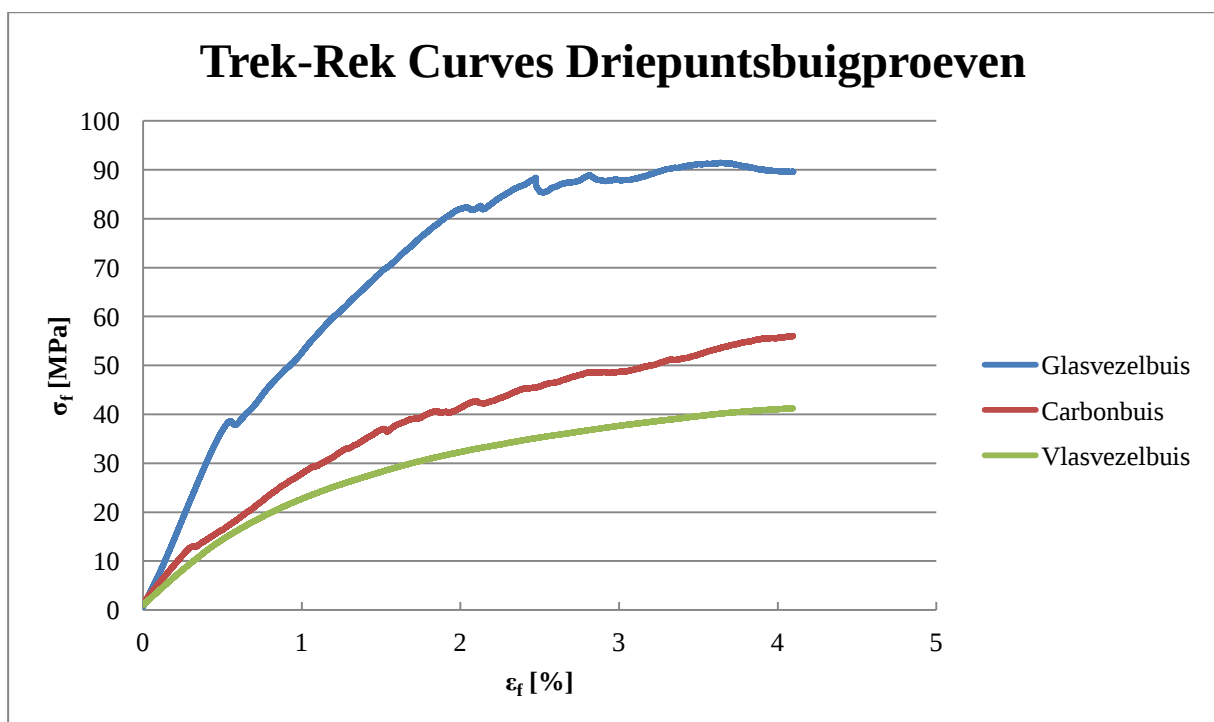
Tabel 6.2: Dikte van de geteste buizen

MATERIAAL	DIKTE [mm]
Glasvezel	4.2
Carbon	1.8
Vlasvezel	3.3

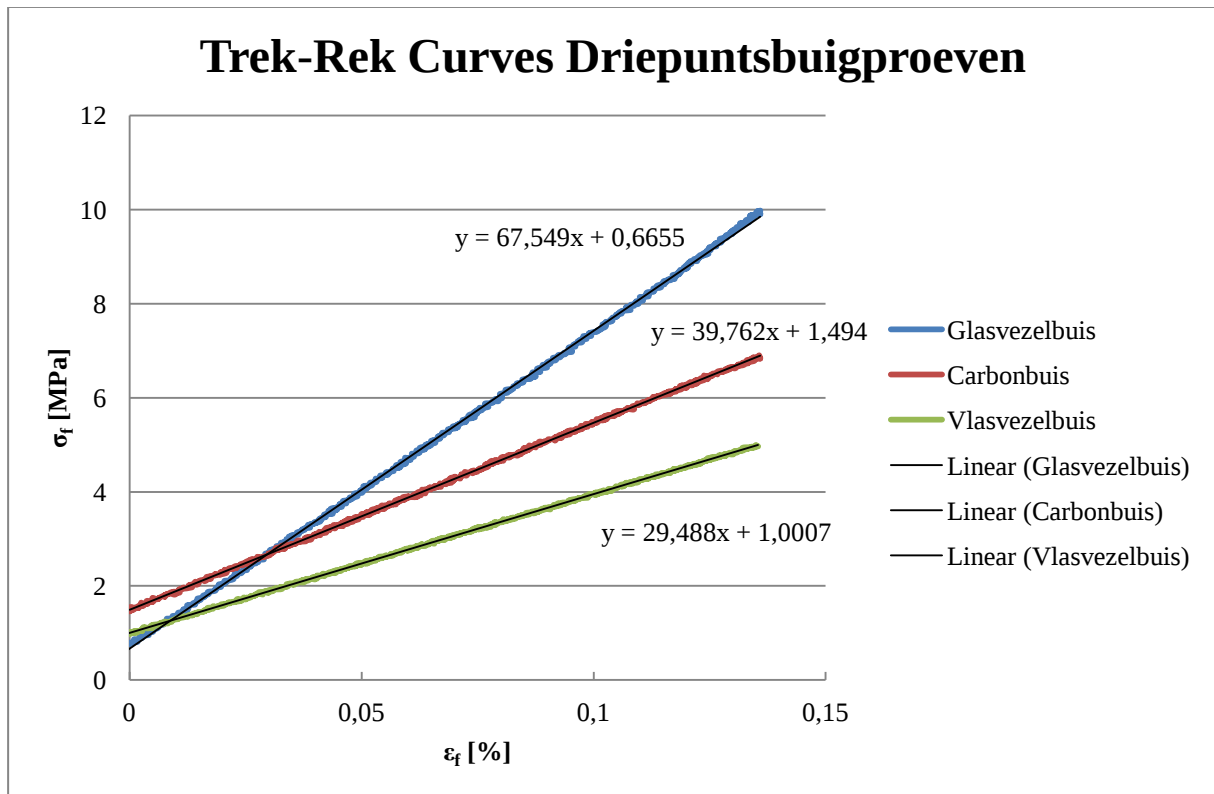
Figuur 6.19 geeft de trek-rek curves van alle buizen onder buiging weer. Bij de glasvezel- en carbonbuis is het punt, waar de belastingspunt in de buis drukt, goed zichtbaar. Tijdens de proef was dit ook waarneembaar door kraakgeluiden. Voor de glasvezelbuis is dit belastingspunt ongeveer bij 0.5 % rek en bij de carbonbuis bij 0.2 % rek. Het verschil ligt hierbij voornamelijk aan de dikte van de buizen. Bij de vlasvezelbuis is er geen duidelijk punt

zichtbaar waar de punt in de buis drukt. De trek-rek curve is veel vloeiender dan bij de andere buizen. Vlasvezelcomposiet is een stuk taaier dan koolstof- en glasvezelcomposiet. Dit verklaart de vorm van de curve.

Uit de testen blijkt ook dat de glasvezelbuis de sterkste is. Dit is te verwachten door de grotere dikte van de wand. Koolstofcomposiet is normaal het sterkste en stijfste materiaal, gevolgd door glasvezel- en vlasvezelcomposiet met equivalente eigenschappen. Alles hangt voornamelijk af van welke proeven er uitgevoerd worden. De aangewende testmethode is niet de beste om conclusies uit te trekken. De manier waarop de buizen vervaardigd zijn, de samenstelling van de composieten (zoals het vezelvolumen), de stapeling van de lagen, ... spelen ook een grote rol. De specifieke buigsterkte van de vlasvezelbuis kan moeilijk bepaald worden, omdat er geen faalpunt zichtbaar is op de grafiek en de buis tijdens de test duidelijk was ingedeukt. De specifieke buigsterkte op het faalpunt van de glasvezelbuis is 0.11 MPa/g en voor de carbonbuis 0.12 MPa/g. Indien de wand van de carbonbuis even dik was als van de glasvezelbuis, dan zou de carbonbuis sterker zijn.



Figuur 6.19: Trek-rek curves van de driepuntsbuigproeven, tot 4 % rek

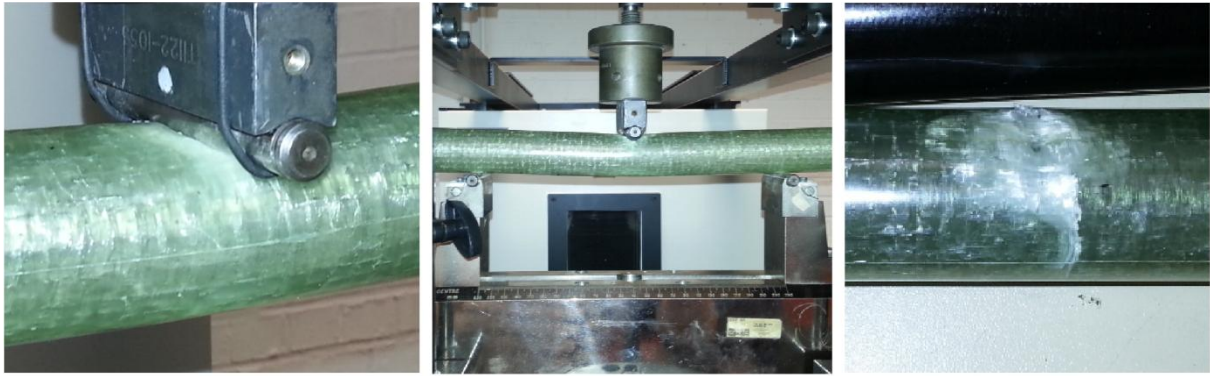


Figuur 6.20: Trek-rek curves van de driepuntsbuigproeven, tot 0.15 % rek

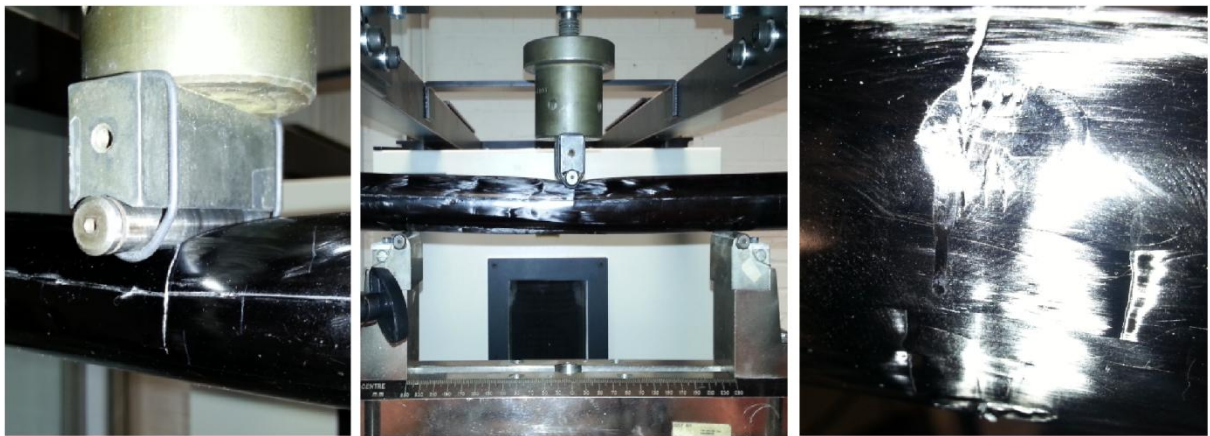
In Figuur 6.20 staan de regressierechten door de meetpunten tot 0.15 % rek. De rico van een regressierechte geeft de stijfheid E_f van buiging weer. Samengevat geeft dit in Tabel 6.3 alle buigstijfheden en massa's van de buizen. Hiermee kan de specifieke buigstijfheid van de buizen bepaald worden. Het vermoeden dat de carbonbuis de hoogste specifieke stijfheid heeft, wordt zo bevestigd. De specifieke stijfheden van de glas- en vlasvezelbuis liggen in dezelfde grootte orde. Normaliter moeten de trek-rek curves door het nulpunt gaan. Dit is hier niet het geval. Voordat de proef startte, werden de buizen onder lichte spanning ingeklemd en de verplaatsingen op nul gezet. Zo stond er al een spanning op de buizen bij 0 relatieve verplaatsing.

Tabel 6.3: Stijfheden onder buiging

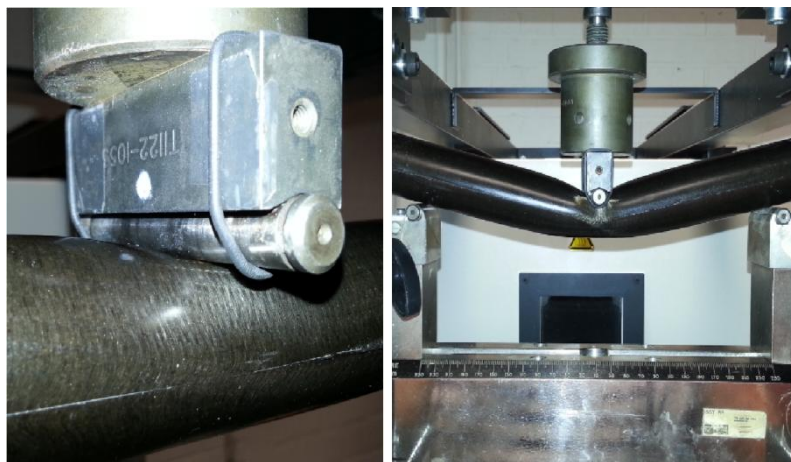
MATERIAAL	E_f [N/mm]	GEWICHT [g]	SPECIFIEKE
			BUIGSTIJFHEID [N/mm/g]
Glasvezelbuis	67.5	350.85	0.19
Carbonbuis	39.7	113.06	0.35
Vlasvezelbuis	29.8	202.55	0.15



Figuur 6.21: Glasvezelbuis onder belasting



Figuur 6.22: Carbonbuis onder belasting



Figuur 6.23: Vlasvezelbuis onder belasting

6.3 Framestijfheid

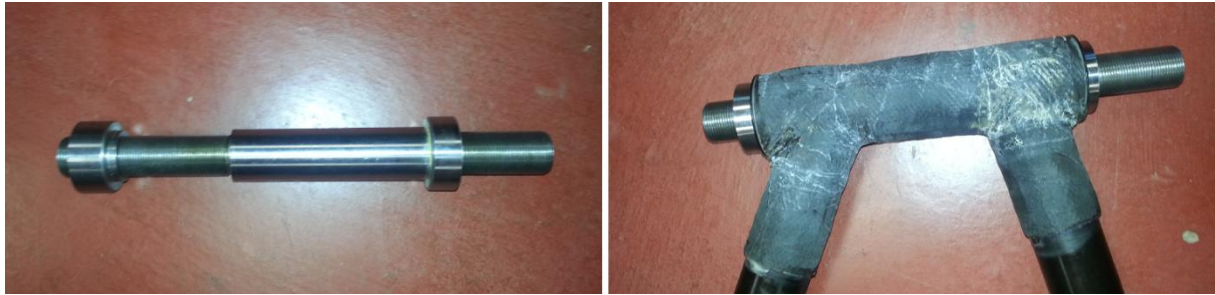
De stijfheid van het volledige frame worden eveneens getest. De vervorming van het frame tijdens uitoefenen van krachten op de pedalen, wordt hier gemeten. Om deze test uit te voeren, wordt gebruik gemaakt van een testbank (Figuur 6.24) waarin het frame aan de headtube wordt ingeklemd. Hiervoor wordt een as getekend en gedraaid, zodat het frame stevig ingeklemd kan worden, zie Figuur 6.26. Aan de as door het bracket wordt een zuiger geplaatst die de kracht van de fietser simuleert. Door middel van lvd't's wordt de horizontale en verticale verplaatsing van de as gemeten, zie Figuur 6.25.



Figuur 6.24: Testopstelling framestijfheid

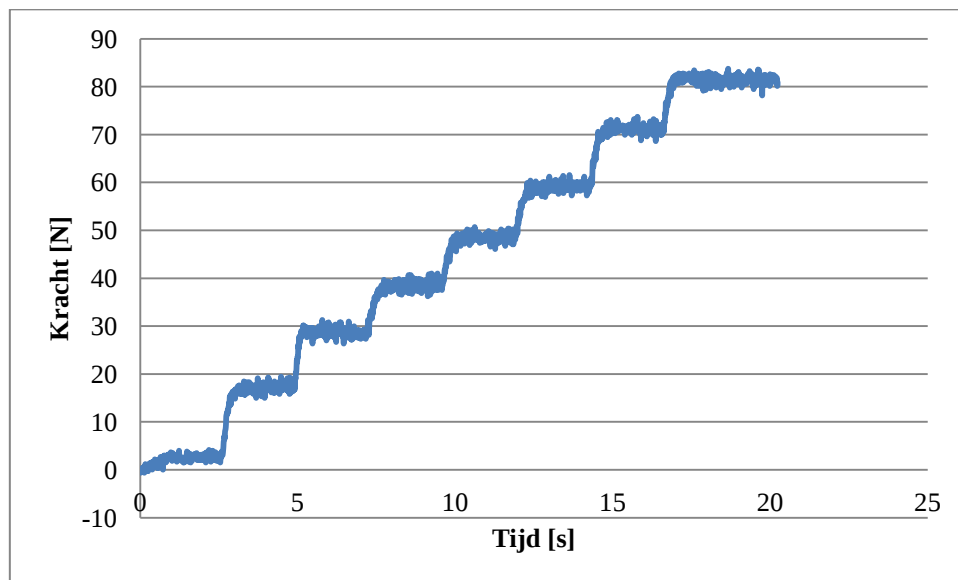


Figuur 6.25: Lvd't's en krachtsensor (onderaan de foto)



Figuur 6.26: As voor framebevestiging in- en uit het frame

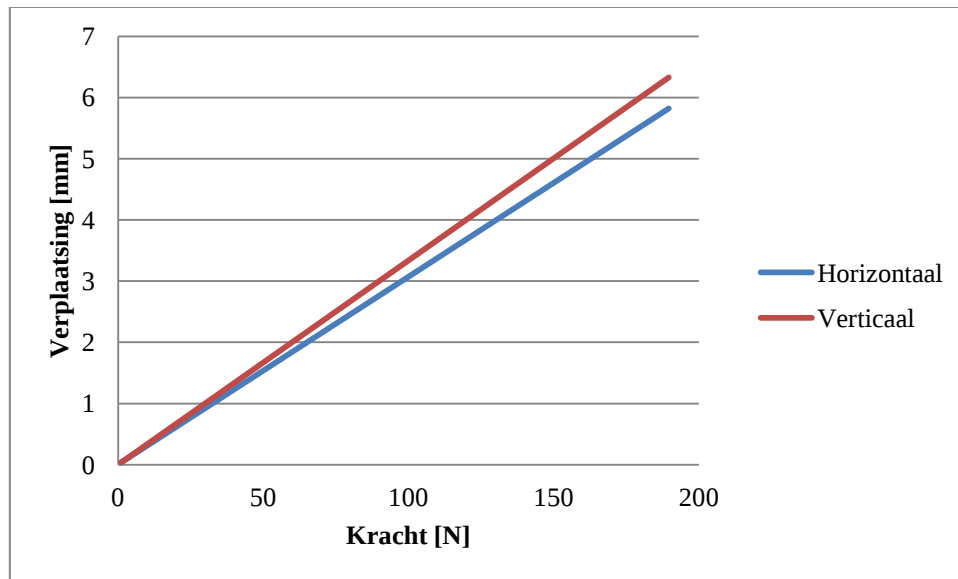
De belasting wordt aangelegd volgens een trapfunctie tot de maximale waarde. Hierdoor kan bij elke tussenwaarde de vervormingstoestand stabiliseren, waardoor een goede benadering van de frame stijfheid wordt bekomen.



Figuur 6.27: Aangelegde kracht in functie van de tijd

De zuiger wordt aangestuurd met behulp van luchtdruk. De kracht die gevraagd wordt, blijkt niet dezelfde te zijn als de kracht die geleverd wordt door de zuiger. De kracht van de zuiger moet dus gemeten worden, zie Figuur 6.25. De krachtmetingen worden samen met de waarden van de lvd's door een labview-programma verwerkt en opgeslagen. Uit deze waarden worden de eigenschappen van het frame berekend.

Bij een eerste test wordt de kracht op de as verticaal aangelegd. Er wordt gebruik gemaakt van een belasting in het vlak van het frame, zodat geen moment wordt uitgevoerd. Dit komt overeen met een fietser die rechtstaat op beide pedalen. De maximale kracht is 200N. Deze waarde wordt zo laag genomen opdat de lvd's binnen hun bereik zouden blijven tijdens de metingen.

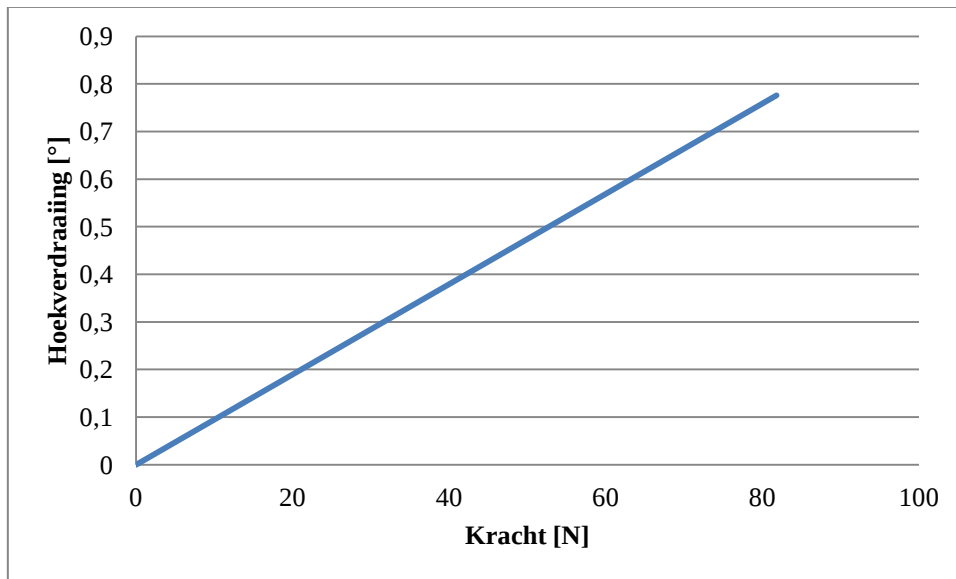


Figuur 6.28: Kracht-verplaatsingscurve frame

De test wordt tien keer herhaald. Daarna wordt een gemiddelde uit de resultaten berekend. Gemiddeld vervormt het frame per 100 N aangelegde kracht, 3.07 mm in horizontale richting en 3.34 mm in verticale richting. Bij een persoon met een gewicht van 70 kg die rechtstaat op de pedalen, komt deze verplaatsing overeen met respectievelijk 21 mm en 23 mm.

In een tweede test wordt een kracht aangelegd volgens de richting van de headtube, namelijk 17° ten opzichte van de verticale. Deze kracht wordt slechts langs een kant van het frame aangelegd, zodat aan het bracket een resulterend moment ontstaat. De maximale kracht die hier wordt aangelegd is 100 N. De plaats waar deze kracht plaatsgrijpt, wordt gekozen op dezelfde afstand van het frame als de gemiddelde afstand van een pedaal, namelijk 150 mm. Hierdoor kunnen de krachten uit de test rechtstreeks vergeleken worden met krachten aangelegd op de pedalen van een fiets.

De lvd's worden aan beide kanten van het frame geplaatst en meten de verplaatsing van het frame volgens de richting van de kracht. Uit het verschil in verplaatsing van de twee lvd's wordt de hoekverdraaiing van het bracket berekend.



Figuur 6.29: Hoekverdraaiing-kracht curve

De gemiddelde waarde die uit de testen bekomen wordt is 105.4 N voor een hoekverdraaiing van 1°.

Het vlasframe heeft heel weinig stijfheid. Tijdens de testen blijkt dat de headtube een groot deel van de vervorming opnam. Deze moet dus stijver gemaakt worden, door bijvoorbeeld meer lagen te gebruiken. Tijdens de testen was ook al te zien dat de vlasvezelbuizen minder stijf waren dan de carbonbuizen. Ook met een betere headtube zal het frame dus minder stijf zijn dan een carbonframe.

Hoofdstuk 7

Besluit

Deze masterproef had initieel tot doel een fietsframe te produceren uit 100 % bio-based materialen. Vlasvezel werd gebruikt als versterkingsvezel en een biohars moest dienen als matrix in de vezelversterkte kunststof. Na verloop van tijd werd duidelijk dat het biohars niet volledig op punt stond en werd er gekozen verder te werken met epoxyhars. Dit gaf de mogelijkheid om in een later stadium, indien het biohars wel voldeed aan de eisen (zoals verhard en minder aanwezigheid van lucht in het mengsel), gebruik te maken van biohars. Deze laatste stap is niet genomen. Er is echter een poging ondernomen om een vlasvezelplaat te maken met een nieuw soort biohars. Het resultaat mocht gezien worden. De plaat was hard, maar bevatte nog veel lucht. Dit is een probleem dat in de toekomst zeker moet verholpen worden voordat het biohars geïntroduceerd wordt op de markt.

Gedurende dit thesisjaar lag de aandacht vooral op het produceren van de buizen van het frame. Deze opdracht is niet zonder slag of stoot verlopen. De productieprocessen waren tijdrovend (minimum een anderhalve dag per stuk). Als er iets foutliep, wat heel vaak voorkwam, was er een dag werk verloren. Uiteraard werd uit de fouten geleerd. Voornamelijk het afsluiten van vacuümopstellingen was een bijzonder secuur werk; het kleinste lek was voldoende om een slecht stuk te bekomen. Uiteindelijk bleek de opstelling met buitenmallen en blaasbalg de beste manier om buizen te maken. Hier zijn de buitenmallen vervaardigd uit glasvezelcomposiet, maar het gebruik van metalen mallen zouden betere resultaten opleveren. Op het moment dat de beslissing over de mallen moest genomen worden, leek het beter niet te wachten op een bestelling, aangezien dit lange tijd zou kunnen duren. Uiteindelijk zouden we veel tijd bespaard hebben. Dan hadden we meer tijd gehad om de lugs te optimaliseren en konden we eventueel meer testen uitvoeren. De buizen zouden van zeer goede kwaliteit zijn en de productiemethode een stuk sneller en minder omslachtig. Tevens zouden de mallen later nog vele malen kunnen herbruikt worden in andere onderzoeken. De mallen uit glasvezelcomposiet hebben na een 10-tal keer gebruiken hun levensduur bereikt.

Het produceren van lugs, het uitvoeren van testen en de numerieke simulaties behoorden oorspronkelijk niet tot de doelstellingen van de masterproef. Door de vrijheid die we kregen, hadden we al vlug beslist voorgenoemde opdrachten ook uit te voeren.

De testen die uitgevoerd werden bevestigen wat kon verwacht worden. De frequentie- en buigproeven tonen aan dat vlasvezelversterkte kunststoffen niet de sterkste en stijfste materialen zijn. Vlasvezel is zeker geen waardige vervanger voor koolstofvezel in raceframes. Om dezelfde karakteristieken als carbonframes te verkrijgen, zou veel meer vlasvezelmateriaal nodig zijn, wat het gewicht niet ten goede komt. Vlasvezel gecombineerd met biohars, zou eventueel ingang kunnen vinden bij de recreatieve fietser, die minder belang hecht aan ‘super’-stijve frames en lichtgewicht fietsen.

Bibliografie

- [1] MUSEEUW BIKES, <http://museeuw bikes.be>, maart 2013.
- [2] DEGRIECK J., cursus COMPOSITEN I, Gent: Universiteit Gent, 2006.
- [3] DE THAYE J., Determination of the static mechanical behaviout of flax-carbon raceframes, Masterproef, Universiteit Gent, 2010.
- [4] www.sciencedirect.com, april 2013
- [5] http://dc370.4shared.com/doc/XzxuUU_I/preview.html, april 2013
- [6] COMPRESSION MOLDING, <http://mechanicalarena.blogspot.be>, april 2013
- [7] Application of Natural Fibre Composites in the Development of Rural Societies, www.fao.org, april 2013
- [8] <http://www.ebay.com/itm/EPOXY-FIBERGLASSING-IMPREGNATING-PARTS-CASTING-CLEAR-/310216705944>, april 2013
- [9] Vacuum bagging and autoclave, www.osha.gov, april 2013
- [10] STAGOBEL, www.stagobel.be, april 2013
- [11] MOLDED FIBERGLASS COMPANIES, www.moldedfiberglass.com, april 2013
- [12] www.crabdev.co.uk, april 2013
- [13] COMPOSITES EUROPE, <http://blog.composites-europe.com/2009/10/26/bioconcept-car-wins-composites-pioneer-award-2009/>, april 2013
- [14] VAN DEN OEVER M. en MOLENVELD K., Biocomposieten 2012: Natuurlijke vezels en bioharsen in technische toepassingen, Wageningen UR, 2012
- [15] BAETS J., PLASTRIA D., IVENS J. en VERPOEST I., Determination of the optimal flax fibre preparation for use in UD flax-epoxy composites, Katholieke Universiteit Leuven, 2007
- [16] VOSSCHEMIE, <http://www.vosschemie-benelux.com/>, September 2012
- [17] WIKIPEDIA, www.wikipedia.org, mei 2013
- [18] BMC CYCLING, www.bmc-racing.com, oktober 2012
- [19] ASTM INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE, www.astm.org, mei 2013
- [20] www.theprojectjunkie.com, juli 2012
- [21] YOUTUBE, www.youtube.com, juli 2012
- [22] Z-FRAME, <http://tinypic.com/view.php?pic=11w6hk8&s=6>, mei 2013

- [23] FSA – bike parts, <http://www.fullspeedahead.com/>, maart 2013
- [24] NOVA CYCLES, <http://www.cycle-frames.com/bicycle-frame-tubing/>, maart 2013
- [25] VAN PAEPEGEM W., DE WAELE W., cursus Mechanice van Materialen, Gent, Universiteit Gent, 2009
- [26] MORTIER F., User's Guide: Filament Winding Machine, Universiteit Gent