



# BREPLA

Biobased fibre REinforced PLAstics

## Leverbaarheid 5.1.2

### Materiaalkarakterisatie van halffabricaten uit WP 2-4

Sirris | Wannes Lembrechts - Linde De Vriese

[wannes.lembrechts@sirris.be](mailto:wannes.lembrechts@sirris.be) - [linde.devriese@sirris.be](mailto:linde.devriese@sirris.be)

Project: HBC.2020.2567 Biogebaseerde Vezelversterkte Kunststoffen

Projectpartners: Centexbel en Sirris

Collectief Onderzoek & Ontwikkeling en Collectieve Kennisverspreiding (COOCK) gesteund door Vlaio

1 januari 2021 - 31 december 2023



**sirris** innovation  
forward

## Lijst van figuren

Figuur 1: UD-vlasvezels [1].....	8
Figuur 2: Vergelijking treksterkte biocomposieten met UD-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie .....	11
Figuur 3: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten met UD-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie .....	11
Figuur 4: Basaltweefsel [8].....	12
Figuur 5: Vergelijking treksterkte biocomposieten met weefsel-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie .....	16
Figuur 6: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten met weefsel-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie .....	17
Figuur 7: Non-woven vlasvezels [19] .....	18
Figuur 8: Vergelijking treksterkte biocomposieten met non-woven-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie .....	21
Figuur 9: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten met non-woven-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie .....	21
Figuur 10: Vergelijking treksterkte biocomposieten uit vlasvezel met verschillende vezelarchitecturen in functie van de vezelvolumefractie.....	23
Figuur 11: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten uit vlasvezel met verschillende vezelarchitecturen in functie van de vezelvolumefractie.....	23
Figuur 12: Specifieke buigsterkte (MPa / g/cm <sup>3</sup> ) en -stijfheid (GPa / g/cm <sup>3</sup> ) van SR-PLA met UD of weefsel uit mono- en multifilamenten vergeleken met SR-PP. Als densiteit voor PLA wordt de waarde 1,24 g/cm <sup>3</sup> genomen. [24] .....	24

## Lijst van tabellen

Tabel 1: UD-biocomposieten met thermohardende matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie $V_f$ en gemiddelde densiteit van het biocomposiet $\rho$ .....	9
Tabel 2: UD-biocomposieten met thermohardende matrix – treksterkte $\sigma_t$ , trekstijfheid $E_t$ , maximale rek in trek $\epsilon_t$ , buigsterkte $\sigma_{flex}$ , buigstijfheid $E_{flex}$ en maximale buigrek $\epsilon_{flex}$ .....	9
Tabel 3: UD-vlas-epoxy biocomposiet – compressiesterkte $\sigma_{compr}$ , interlaminaire afschuifsterkte ILSS, afschuifsterkte in het vlak $\tau_{45}$ en afschuifstijfheid in het vlak $G_{45}$ .....	9
Tabel 4: UD-biocomposieten met thermoplastische matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie $V_f$ en gemiddelde densiteit van het biocomposiet $\rho$ .....	10
Tabel 5: UD-biocomposieten met thermoplastische matrix – treksterkte $\sigma_t$ , trekstijfheid $E_t$ , maximale rek in trek $\epsilon_t$ , buigsterkte $\sigma_{flex}$ , buigstijfheid $E_{flex}$ en maximale buigrek $\epsilon_{flex}$ .....	10
Tabel 6: weefsel-biocomposieten met thermohardende matrix en 2x2 weefstructuur – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie $V_f$ en gemiddelde densiteit van het biocomposiet $\rho$ ..	14
Tabel 7: weefsel-biocomposieten met thermohardende matrix en 2x2 weefstructuur – treksterkte $\sigma_t$ , trekstijfheid $E_t$ , maximale rek in trek $\epsilon_t$ , buigsterkte $\sigma_{flex}$ , buigstijfheid $E_{flex}$ en maximale buigrek $\epsilon_{flex}$ .....	14
Tabel 8: Weefsel-vlas-epoxy biocomposiet met 2x2 weefstructuur – compressiesterkte $\sigma_{compr}$ , interlaminaire afschuifsterkte ILSS, afschuifsterkte in het vlak $\tau_{45}$ en afschuifstijfheid in het vlak $G_{45}$ .....	14

Tabel 11: Weefsel-biocomposieten met thermoplastische matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie  $V_f$  en gemiddelde dichtheid van het biocomposiet  $\rho$ .....15

Tabel 12: Weefsel-biocomposieten met thermoplastische matrix – weefstructuur, treksterkte  $\sigma_t$ , trekstijfheid  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigstijfheid  $E_{flex}$  en maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$  .....15

Tabel 15: Non-woven-biocomposieten met thermohardende matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie  $V_f$  en gemiddelde dichtheid van het biocomposiet  $\rho$ ..... 19

Tabel 16: Non-woven-biocomposieten met thermohardende matrix – treksterkte  $\sigma_t$ , trekstijfheid  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigstijfheid  $E_{flex}$ , maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$  en ILSS ..... 19

Tabel 17: Non-woven-biocomposieten met thermoplastische matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal en vezelvolumefractie  $V_f$  ..... 20

Tabel 18: Non-woven-biocomposieten met thermoplastische matrix – treksterkte  $\sigma_t$ , trekstijfheid  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigstijfheid  $E_{flex}$  en maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$  ..... 20

## Lijst van afkortingen

Bas	: Basalt
BEp	: Bioepoxy
CD	: Cross direction
Ep	: Epoxy
He	: Hennep
ILSS	: Interlaminaire afschuifsterkte
Jut	: Jute
MD	: Machine direction
NW	: Non woven
PA11	: Polyamide 11
PBS	: Polybutylene succinate
PE	: Polyester
PHA	: Polyhydroxyalkanoaat
PLA	: Polymelkzuur
PMMA	: Poly(methyl methacrylate)
PP	: Polypropyleen
RTM	: Resin transfer molding
SR	: Self reinforced
SRPC	: Self reinforced polymer composite
TP	: Thermoplastisch polymeer
TS	: Thermohardend polymeer
UD	: Uni-directioneel
UP	: Onverzadigd polyester
Vla	: Vlas
Wf	: Weefsel

## Lijst van symbolen

$\epsilon_{flex}$	: Maximale buigrek
$\epsilon_t$	: Maximale rek in trek
$\rho$	: Densiteit
$\sigma_{compr}$	: Compressiesterkte
$\sigma_{flex}$	: Buigsterkte
$\sigma_t$	: Treksterkte
$\tau_{45}$	: Afschuifsterkte in het vlak
$E_{flex}$	: Buigstijfheid
$E_t$	: Trekstijfheid
$G_{45}$	: Afschuifstijfheid in het vlak
$V_f$	: Vezel volumefractie

## Inhoudstafel

Introductie.....	6
1 Teststandaarden.....	7
2 Biocomposieten uit UD-vezels.....	8
2.1 Thermohardende matrix.....	8
2.2 Thermoplastische matrix.....	10
2.3 Vergelijking treksterkte en -stijfheid van UD-biocomposieten.....	10
3 Biocomposieten met weefsel-architectuur.....	12
3.1 Thermohardende matrix.....	13
3.2 Thermoplastische matrix.....	15
3.3 Vergelijking treksterkte en -stijfheid van weefsel-biocomposieten.....	16
4 Biocomposieten uit non-woven vezelstructuur.....	18
4.1 Thermohardende matrix.....	18
4.2 Thermoplastische matrix.....	19
4.3 Vergelijking treksterkte en -stijfheid non-woven-biocomposieten.....	20
5 Vergelijking van de sterkte en stijfheid voor vlasvezel- biocomposieten.....	22
6 Zelfversterkte biopolymeren.....	24
7 Conclusie.....	25
8 Referenties.....	26

## Introductie

Bij productontwerp is het belangrijk de karakteristieken van het gebruikte materiaal goed te kennen. De eigenschappen van biocomposieten zijn afhankelijk van meerdere factoren zoals productieproces, vezelarchitectuur, vezelrichting, vezelvolumefractie en de polymeren matrix, de bereikte vezel-matrix hechting en de omgeving waarin het biocomposiet zich bevindt.

Dit verslag geeft een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten als 2D-plaatmateriaal. De biocomposieten die vergeleken worden verschillen zowel in productieproces (RTM, autoclaaf, vacuüminfusie, thermocompressie), vezel (vlas, hennep, basalt), vezelvolumefractie, matrix (thermohardend / thermoplastisch, bio / niet-bio) en vezelarchitectuur (UD, weefsel, quasi-isotroop UD en non-woven). Hoewel enkele resultaten van hennep- en basaltvezel worden weergegeven, ligt de focus van dit verslag op vlasvezels. Dit komt door de hoge commerciële beschikbaarheid van vlasvezels en omdat hierrond het meeste data te verkrijgen is. Vanwege de karakterisatie van biocomposieten als plaatmateriaal neemt dit verslag de eigenschappen van tows/rovings en pellets niet mee in de vergelijking.

Dit verslag is ingedeeld volgens de vezelarchitectuur van de biocomposieten. Hoofdstuk 1 is een algemeen hoofdstuk dat een overzicht geeft van de testen en de standaarden die hiervoor gevolgd zijn. De volgende hoofdstukken bespreken een voor een de mechanische eigenschappen voor een UD-vezelarchitectuur (Hoofdstuk 2), weefsel-vezelarchitectuur (Hoofdstuk 3) en een non-woven-vezelarchitectuur (Hoofdstuk 4). Hoofdstuk 2, 3 en 4 zijn verder onderverdeeld in resultaten voor biocomposieten met een thermohardende matrix en biocomposieten met een thermoplastische matrix. Twee grafieken sluiten Hoofdstuk 2, 3 en 4 af waarop een overzicht van de treksterkte en de trekstijfheid voor biocomposieten in functie van de vezelvolumefractie worden weergegeven. Vervolgens toont Hoofdstuk 5 een totaaloverzicht van de treksterkte- en trekstijfheidsresultaten in dit verslag voor vlasvezelcomposieten.

Hoofdstuk 6 bespreekt de mechanische eigenschappen die te verwachten zijn voor zelfversterkte PLA composieten met een UD- of weefselvezelversterking uit mono- en multifilamenten. Hierbij worden deze eigenschappen vergeleken met het conventioneel zelfversterkte PP composiet (Curv).

## 1 Teststandaarden

Om testresultaten vergelijkbaar te maken zijn internationale teststandaarden opgesteld die afhankelijk zijn van materiaaltype en de te testen parameter. Deze teststandaarden kunnen onderzoekers volgen zodat de testen vanwege de internationale vergelijkbaarheid meer waarde krijgen.

De testresultaten die in dit verslag beschreven staan voor de trek-, buig-, compressie-, interlaminare afschuifeigenschappen en afschuifeigenschappen in het vlak zijn volgens dezelfde teststandaarden gegenereerd. Meestal werd door de onderzoekers een ISO-standaard gevolgd, enkel voor de compressietest werd een ASTM-standaard gevolgd. De gebruikte standaard voor de weergegeven resultaten in dit onderzoek is hieronder weergegeven in het vetgedrukt. Voor de vergeleken parameters in dit onderzoek is er echter zowel een ISO- als een ASTM-standaard. De parallelle standaard is hierdoor ook, niet-vetgedrukt, weergegeven.

Hoe de testen in hun werk gaan, staat uitgelegd op de website van testmachinefabrikant Instron®, hierdoor is ook de link naar deze pagina's toegevoegd.

- **Trektest:** **ISO 527-4** - ASTM D3039  
<https://www.instron.com/en/testing-solutions/iso-standards/iso-527-4>
- **Buigtest:** **ISO 14125** - ASTM D7264  
<https://www.instron.com/en/testing-solutions/iso-standards/iso-14125>
- **Compressietest:** **ASTM D6641** - ISO/DIS 14126  
<https://www.instron.com/en/testing-solutions/astm-standards/astm-d6641>
- **Interlaminare afschuiftest:** **ISO 14130 1** - ASTM D2344  
<https://www.instron.com/en/testing-solutions/iso-standards/iso-14130>
- **Afschuiftest in het vlak:** **ISO 14129** - ASTM D3518  
<https://www.instron.com/en-in/testing-solutions/iso-standards/iso-14129>

## 2 Biocomposieten uit UD-vezels

Dit hoofdstuk toont, bespreekt en vergelijkt de mechanische eigenschappen van biocomposieten met UD-vezelstructuur. Om een voorbeeld te geven hoe een UD-vezelstructuur er kan uitzien toont Figuur 1 een voorbeeld van UD-vlasvezels.

In dit hoofdstuk bespreekt Sectie 2.1 de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een thermohardende matrix. De biocomposieten die in deze sectie worden vergeleken zijn opgebouwd uit vlas- en hennepvezel geïmpregneerd met een epoxy en bioepoxy hars. Sectie 2.2 bespreekt de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een thermoplastische matrix bestaand uit vlas-PP en vlas-PLA.

Vanwege het belang van de treksterkte en trekstijfheid als materiaalparameter voor een product en de goede reproduceerbaarheid tijdens het testen toont Sectie 2.3 twee grafieken die een overzicht van deze parameters geven voor biocomposieten. Deze grafieken tonen welke sterkte- en stijfheidswaarden kunnen verwacht worden voor UD-biocomposieten, wat de relatie is met de vezelvolumefractie en welke vezel en matrix de hoogste waarden bekomen.



Figuur 1: UD-vlasvezels [1]

### 2.1 Thermohardende matrix

Tabel 1 en 2 geven een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten uit UD-vezels met een thermohardende matrix, beiden geven dezelfde samples weer. De sample benaming is via afkortingen opgebouwd als volgt:

Vezelstructuur – vezeltype – matrixtype – vezelvolumefractie . samplenummer in deze tabel

Een UD-vezelstructuur heeft zeer goede mechanische eigenschappen in de vezelrichting ( $0^\circ$ ) en lage mechanische eigenschappen loodrecht op de vezelrichting ( $90^\circ$ ), dit is ook te zien in Tabel 2. Als in Tabel 2 slechts één waarde wordt weergegeven is dit de waarde in de vezelrichting.

UD-vezels laten vanwege de hoge specifieke stijfheid en –sterkte in de vezelrichting om het gewicht van een product te optimaliseren. Hierdoor wordt dit materiaal vooral voor



hoogwaardige toepassingen gebruikt. Dit is te zien in Tabel 1 vanwege het gebruik van prepreg in een autoclaaf en het gebruik van het RTM-proces.

De resultaten voor de hennep-biocomposieten komen uit een studie waar het hennep-type vergeleken wordt. De hennepvezel uit sample UD-He-BEp-30.4 heeft de benaming Futura 75 en komt uit Piacenza in Noord-Italië. Hiernaast heeft de hennepvezel uit sample UD-He-BEp-30.5 de benaming Santhica 27 en komt deze uit Ales in Zuid-Frankrijk. Het laatste type hennepvezel uit sample UD-He-BEp-30.6 heeft de benaming Fedora 17 en komt uit La croix en Champagne in Oost-Frankrijk. [2]

Een vergelijking tussen mechanische eigenschappen van het vlasvezel- en hennepvezel-composiet is moeilijk te maken vanwege de sterk verschillende vezelvolumefractie. Figuur 2 en 3 uit Sectie 2.3 zullen deze vergelijking intuïtiever maken.

Tabel 3 toont ten slotte de compressiesterkte en afschuifeigenschappen van het UD-Vla-Ep-45.3-sample. Deze eigenschappen worden namelijk niet frequent teruggevonden in de verschillende onderzoeken en datasheets. Omdat dit het enige sample is, is een vergelijking niet mogelijk, wel geeft dit weer welke compressie- en afschuifeigenschappen mogelijk zijn voor UD-vlas-epoxy biocomposieten. Een vergelijking tussen de compressiesterkte en treksterkte toont dat de compressiesterkte tegenover de treksterkte lager is in de vezelrichting (0°) en hoger loodrecht op de vezelrichting (90°).

Tabel 1: UD-biocomposieten met thermohardende matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie  $V_f$  en gemiddelde dichtheid van het biocomposiet  $\rho$ ; dichtheid aangegeven met \* is theoretisch berekend met een veronderstelde dichtheid van 1,48 g/cm<sup>3</sup> voor hennepvezel en 1,1 g/cm<sup>3</sup> voor bioepoxy

Sample naam	Bron	Vezel	Matrix	Proces	$V_f$ (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
UD-Vla-Ep-45.1	[3]	Vlas	Epoxy	Prepreg autoclaaf	45	1,3
UD-Vla-Ep-50.2	[4]	Vlas	Epoxy	RTM	50	1,31
UD-Vla-Ep-45.3	[5]	Vlas	Epoxy	Prepreg autoclaaf	45	1,3
UD-He-BEp-30.4	[2]	Hennep	Bioepoxy	RTM	30	1,21*
UD-He-BEp-30.5	[2]	Hennep	Bioepoxy	RTM	30	1,21*
UD-He-BEp-30.6	[2]	Hennep	Bioepoxy	RTM	30	1,21*

Tabel 2: UD-biocomposieten met thermohardende matrix – treksterkte  $\sigma_t$ , trekmodulus  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigmodulus  $E_{flex}$  en maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$

Sample naam	$\sigma_t$ (MPa) 0° / 90°	$E_t$ (GPa) 0° / 90°	$\epsilon_t$ (%)	$\sigma_{flex}$ (MPa) 0° / 90°	$E_{flex}$ (GPa) 0° / 90°	$\epsilon_{flex}$ (%)
UD-Vla-Ep-45.1	365	35	1,35	300	27,5	2,6
UD-Vla-Ep-50.2	365	35	1,35	294	31	2,6
UD-Vla-Ep-45.3	269 / 26	30,4 / 4,6	/	356 / 58,4	26,3 / 3,9	/
UD-He-Ep-30.4	175	16	1,8	/	/	/
UD-He-Ep-30.5	151	17,4	1,9	/	/	/
UD-He-Ep-30.6	116	12,7	1,4	/	/	/

Tabel 3: UD-vlas-epoxy biocomposiet – compressiesterkte  $\sigma_{compr}$ , interlaminaire afschuifsterkte ILSS, afschuifsterkte in het vlak  $\tau_{45}$  en afschuifstijfheid in het vlak  $G_{45}$

Sample naam	$\sigma_{compr}$ (Mpa) 0° / 90°	ILSS (Mpa)	$\tau_{45}$ (Mpa)	$G_{45}$ (Gpa)
UD-Vla-Ep-45.3	166 / 111	32,7	52,3	2

## 2.2 Thermoplastische matrix

Tabel 4 en 5 geven een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten uit UD-vezels met een thermoplastische matrix, beiden geven dezelfde samples weer. De sample benaming is via afkortingen opgebouwd als volgt:

Vezelstructuur – vezeltype – matrixtype – vezelvolumefractie . samplenummer in deze tabel

Zoals ook de weefsel- en non-woven samples met een thermoplastische matrix zijn deze samples steeds via thermocompressie geproduceerd. Dit komt doordat dit proces bij thermoplastische composieten de mogelijkheid geeft voor een hoge vezelvolumefractie, hoge productkwaliteit en hoge reproduceerbaarheid van de samples.

De samples in deze tabellen bestaan steeds uit vlasvezel gecombineerd met polypropyleen (PP) of het biogebaseerde polymelkzuur (PLA). De resultaten in de tabel tonen dat de mechanische eigenschappen van de PP- en PLA- samples in dezelfde range zitten, maar deze tonen ook een grote variatie in mechanische eigenschappen voor zowel de PP- als PLA samples. Figuur 2 en 3 uit Sectie 2.3 geven een intuïtiever beeld van de treksterkte en -stijfheid van deze en de thermohardende UD-samples.

Tabel 4: UD-biocomposieten met thermoplastische matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie  $V_f$  en gemiddelde densiteit van het biocomposiet  $\rho$ ; densiteit aangegeven met \* is theoretisch berekend met een veronderstelde densiteit van  $1,4 \text{ g/cm}^3$  voor vlasvezel,  $0,9 \text{ g/cm}^3$  voor PP en  $1,24 \text{ g/cm}^3$  voor PLA

Sample naam	Bron	Vezel	Matrix	Proces	$V_f$ (%)	$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )
UD-Vla-PP-43.1	[4]	Vlas	PP	Thermocompressie	43	1,13
UD-Vla-PP-25.2	[6]	Vlas	PP	Thermocompressie	25	1,03*
UD-Vla-PP-39.3	[6]	Vlas	PP	Thermocompressie	39	1,1*
UD-Vla-PLA-33.4	[6]	Vlas	PLA	Thermocompressie	33	1,3*
UD-Vla-PLA-40.5	[7]	Vlas	PLA	Thermocompressie	40	1,04

Tabel 5: UD-biocomposieten met thermoplastische matrix – treksterkte  $\sigma_t$ , trekmodulus  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigmodulus  $E_{flex}$  en maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$

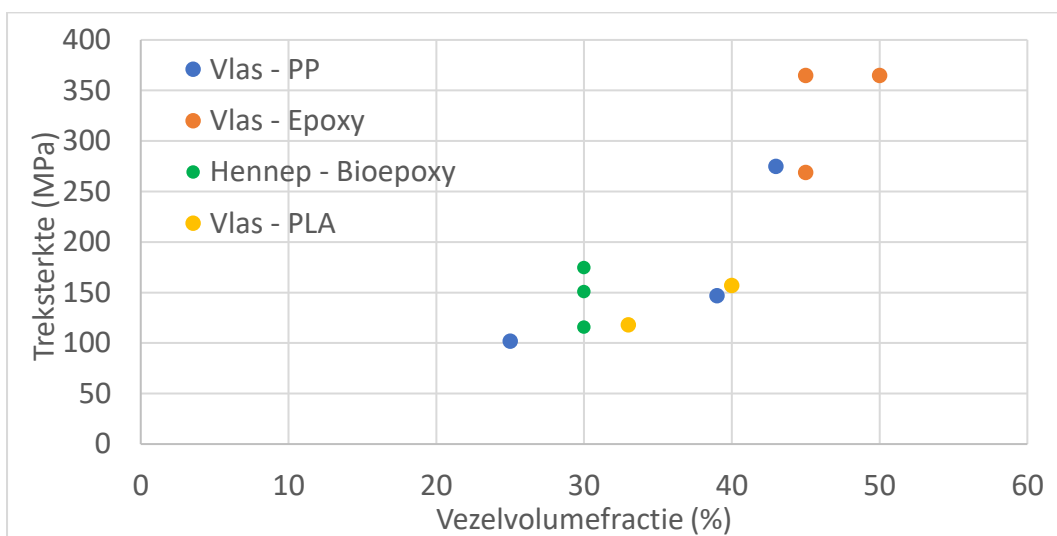
Sample naam	$\sigma_t$ (MPa)	$E_t$ (GPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\sigma_{flex}$ (MPa)	$E_{flex}$ (GPa)	$\epsilon_{flex}$ (%)
UD-Vla-PP-43.1	275	33	1,22	210	23	2,1
UD-Vla-PP-25.2	102	9,2	/	86	7,4	/
UD-Vla-PP-39.3	147	15,5	/	122	11,4	/
UD-Vla-PLA-33.4	118	11,1	/	105	9,3	/
UD-Vla-PLA-40.5	157	27,4	0,8	222	22,6	/

## 2.3 Vergelijking treksterkte en -stijfheid van UD-biocomposieten

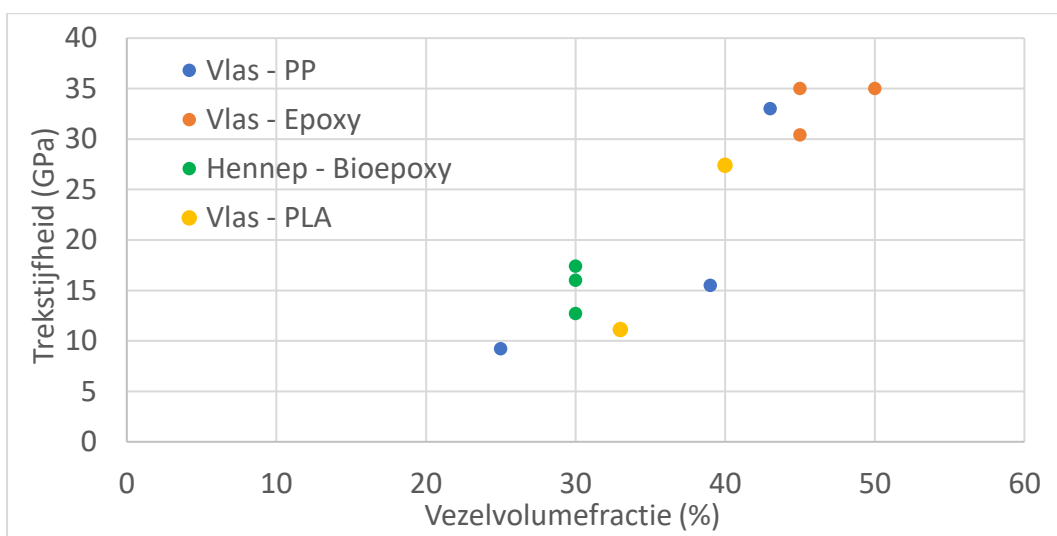
Vanwege het belang van de treksterkte en trekstijfheid als materiaalparameter voor een product en de goede reproduceerbaarheid tijdens het testen geven Figuur 2 en 3 een overzicht van deze eigenschappen voor verschillende UD-biocomposieten uit Sectie 2.1 en 2.2. Deze vergelijking geeft de sterkte- en stijfheidswaarden in de vezelrichting weer.

Om te beginnen tonen Figuur 2 en 3 dat, zoals te verwachten, over het algemeen de treksterkte en -stijfheid toenemen bij stijgende vezelvolumefractie. De vergelijking tussen vlas- en hennepvezel leert dat de hennepvezelcomposieten in dezelfde range zitten als vlasvezelcomposieten met een gelijkaardige vezelvolumefractie. Het meest performante hennep type doet het zelfs beter dan de onderzoeksresultaten van de vlasvezelcomposieten met een gelijkaardige vezelvolumefractie die vergeleken zijn in dit project.

Voor de vergelijking tussen de verschillende matrices kan gezegd worden dat vlas-epoxy samples een hoge vezelvolumefractie en hierbij ook een hoge stijfheid en sterkte bekomen. De andere biocomposieten hebben over het algemeen een lagere sterkte en stijfheid, maar ook een lagere vezelvolumefractie. Bij constante vezelvolumefractie kan gezegd worden dat UD-biocomposieten met biopolymeer vlas-PLA en hennep-bioepoxy een vergelijkbare sterkte en stijfheid vertonen dan de biocomposieten met een conventionele polymeermatrix (met PP of epoxy).



Figuur 2: Vergelijking treksterkte biocomposieten met UD-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie



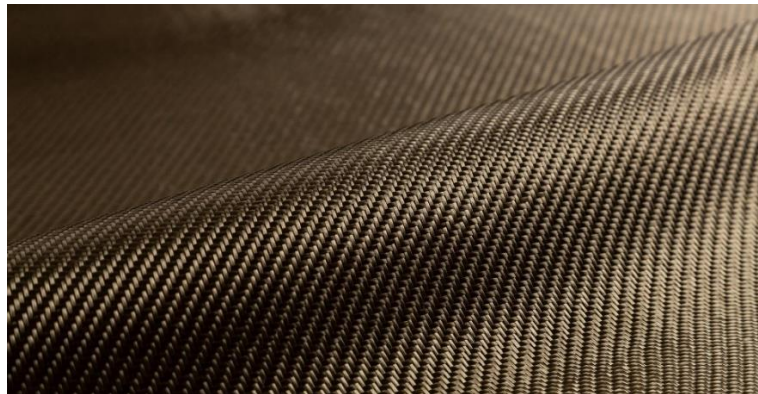
Figuur 3: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten met UD-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie

### 3 Biocomposieten met weefsel-architectuur

Dit hoofdstuk toont, bespreekt en vergelijkt de mechanische eigenschappen van biocomposieten met weefsel-vezelstructuur. Om een voorbeeld te geven hoe een weefsel-vezelstructuur er kan uitzien toont Figuur 4 een voorbeeld van een basaltweefsel.

In dit hoofdstuk bespreekt Sectie 3.1 de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een thermohardende matrix. De biocomposieten die in deze sectie worden vergeleken zijn opgebouwd uit vlas- en basaltvezel geïmpregneerd met een epoxy of een bioepoxy hars. Hiernaast vergelijkt deze sectie ook een minder voorkomend biocomposiet uit jutevezels geïmpregneerd met onverzadigd polyester. Verder bespreekt Sectie 3.2 de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een thermoplastische matrix bestaande uit vlas-PP en vlas met biopolymeren PLA en PA11.

Vanwege het belang van de treksterkte en trekstijfheid als materiaalparameter voor een product en de goede reproduceerbaarheid tijdens het testen toont Sectie 3.3 twee grafieken die een overzicht van deze parameters geven voor biocomposieten. Deze grafieken tonen welke sterkte- en stijfheidswaarden kunnen verwacht worden, wat de relatie is met de vezelvolumefractie en welke vezel en matrix de hoogste waarden bekomen bij biocomposieten met een weefsel-architectuur.



*Figuur 4: Basaltweefsel [8]*

### 3.1 Thermohardende matrix

Tabel 6 en 7 geven een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een weefselarchitectuur en een thermohardende matrix, beiden geven dezelfde samples weer. De sample benaming is via afkortingen opgebouwd als volgt:

Vezelstructuur – vezeltype – matrixtype – vezelvolumefractie . samplenummer in deze tabel

Bij weefsels liggen de vezels loodrecht op elkaar. De mechanische eigenschappen in deze twee vezelrichtingen zijn zo goed als gelijk. Hierdoor staat in Tabel 6 en 7 één waarde die de eigenschappen in de twee vezelrichtingen beschrijft. De biocomposieten in deze tabellen zijn steeds opgebouwd uit een 2x2 weefstructuur van de vezels.

De processen die gebruikt zijn om deze vlakke plaat weefsel-biocomposieten te maken zijn vacuüminfusie, RTM en een autoclaafproces voor prepregs. Tabel 6 toont dat de hoogste vezelvolumefracties bereikt kunnen worden door gebruik te maken van prepregs, maar ook het RTM-proces kan vanwege de hogere druk een hoog vezelpercentage bereiken. De vezelvolumefractie bij een vacuüminfusieproces is over het algemeen lager vanwege de lagere vacuümdruk.

Voor de vergelijking in mechanische eigenschappen toont Tabel 7 om te beginnen uit de vergelijking van sample Wf-Vla-BEp-38.10 en Wf-Bas-BEp-38.11 dat, voor hetzelfde productieproces en dezelfde matrix, basaltvezelcomposieten +- 2 keer zo stijf en +- 3-4 keer zo sterk zijn als vlasvezelcomposieten. Verder zijn de sterkte en stijfheid van vlas-epoxy prepregs door een autoclaaf geproduceerd duidelijk hoger dan de andere samples en benadert de stijfheid van deze samples de stijfheid van het basalt – bioepoxy sample dat via vacuüminfusie geproduceerd is.

De resultaten van de overige biocomposieten hebben een grote spreiding waarbij geen duidelijke stijging in sterkte en stijfheid te zien is bij hogere vezelvolumefractie. Dit is tegen de verwachting, de reden hiervoor is aan de hand van deze resultaten niet meteen te verklaren. Figuur 5 en 6 in Sectie 3.3 zullen verder een visueel overzicht geven van de treksterkte en -stijfheid van deze samples.

Tabel 8 toont ten slotte de compressiesterkte en afschuifeigenschappen van drie vlas-epoxy weefsel-biocomposieten uit hetzelfde onderzoek, de Wf-Vla-Ep-49.7, Wf-Vla-Ep-47.8 en Wf-Vla-Ep-49.9. Deze eigenschappen worden niet frequent teruggevonden in de verschillende onderzoeken en datasheets. Deze tabel geeft weer welke compressie- en afschuifeigenschappen mogelijk zijn voor vlasweefsel-epoxy biocomposieten. Verder kan gezegd worden dat de compressiesterkte van deze onderzoeksresultaten 25-35 MPa lager is dan de treksterkte.

Tabel 6: weefsel-biocomposieten met thermohardende matrix en 2x2 weefstructuur – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie  $V_f$  en gemiddelde densiteit van het biocomposiet  $\rho$ ; ; densiteit aangegeven met \* is theoretisch berekend met een veronderstelde densiteit van  $1,4 \text{ g/cm}^3$  voor vlasvezel,  $1,1 \text{ g/cm}^3$  voor bioepoxy en  $1,1 \text{ g/cm}^3$  voor epoxy

Sample naam	Bron	Vezel	Matrix	Proces	$V_f$ (%)	$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )
Wf-Vla-BEp-40.1	[8]	Vlas	Bioepoxy	RTM	40	1,13
Wf-Vla-BEp-55.2	[8]	Vlas	Bioepoxy	RTM	55	1,27*
Wf-Vla-Ep-34.3	[9]	Vlas	Epoxy	Vacuüminfusie	34,1	1,20*
Wf-Vla-Ep-41.4	[10]	Vlas	Epoxy	/	41	1,27
Wf-Vla-Ep-46.5	[11]	Vlas	Epoxy	/	46	1,29
Wf-Vla-Ep-50.6	[12]	Vlas	Epoxy	/	50	1,3
Wf-Vla-Ep-49.7	[5]	Vlas	Epoxy	Prepreg Autoclaaf	49	1,33
Wf-Vla-Ep-47.8	[5]	Vlas	Epoxy	Prepreg Autoclaaf	47	1,31
Wf-Vla-Ep-49.9	[5]	Vlas	Epoxy	Prepreg Autoclaaf	49	1,32
Wf-Vla-BEp-38.10	[13]	Vlas	Bioepoxy	RTM	38	1,21*
Wf-Bas-BEp-39.11	[13]	Basalt	Bioepoxy	RTM	39,3	1,72*
Wf-Jut-PE-35.12	[14]	Jute	Onverzadigd polyester	Vacuüminfusie	35	1,28

Tabel 7: weefsel-biocomposieten met thermohardende matrix en 2x2 weefstructuur – treksterkte  $\sigma_t$ , trekmodulus  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigmodulus  $E_{flex}$  en maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$

Sample naam	$\sigma_t$ (MPa)	$E_t$ (GPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\sigma_{flex}$ (MPa)	$E_{flex}$ (GPa)	$\epsilon_{flex}$ (%)
Wf-Vla-BEp-40.1	63-81	7.24	1.8-2.8	105-120	7.77	2.95-3.25
Wf-Vla-BEp-55.2	70-88	7.67	3.6-4.6	115-130	6.96	4.65-4.95
Wf-Vla-Ep-34.3	105	9,8	1,75	122	6,7	2,51
Wf-Vla-Ep-41.4	100	11,2	1,2	106	9,4	1,68
Wf-Vla-Ep-46.5	113	11,2	1,7	126	8,9	3,2
Wf-Vla-Ep-50.6	102	12,2	1,6	105,9	10,9	1,7
Wf-Vla-Ep-49.7	160	17,5	/	204-215	17,2-17,9	/
Wf-Vla-Ep-47.8	184	18.5	/	/	/	/
Wf-Vla-Ep-49.9	179	18.5	/	/	/	/
Wf-Vla-BEp-38.10	122	8,4145	3	132,5	8,219	3,7
Wf-Bas-BEp-39.11	471	20,1985	2,9	403	16,85	2,65
Wf-Jut-PE-35.12	54,5	8,3	1	65,5	5,6	/

Tabel 8: Weefsel-vlas-epoxy biocomposiet met 2x2 weefstructuur – compressiesterkte  $\sigma_{compr}$ , interlaminaire afschuifsterkte ILSS, afschuifsterkte in het vlak  $\tau_{45}$  en afschuifstijfheid in het vlak  $G_{45}$

Sample naam	$\sigma_{compr}$ (MPa)	ILSS (MPa)	$\tau_{45}$ (MPa)	$G_{45}$ (GPa)
Wf-Vla-Ep-49.7	135,5	28,3	50,1	2
Wf-Vla-Ep-47.8	152	27	52,2	/
Wf-Vla-Ep-49.9	145	27,2	44,6	/

### 3.2 Thermoplastische matrix

Tabel 11 en 12 geven een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een weefselarchitectuur en een thermoplastische matrix, beiden geven dezelfde samples weer. De sample benaming is via afkortingen opgebouwd als volgt:

Vezelstructuur – vezeltype – matrixtype – vezelvolumefractie . samplenummer in deze tabel

Bij weefsels liggen de vezels loodrecht op elkaar. De mechanische eigenschappen in deze twee vezelrichtingen zijn zo goed als gelijk. Hierdoor staat in Tabel 11 en 12 steeds één waarde die de eigenschappen in de twee vezelrichtingen beschrijft.

Zoals ook de UD- en non-woven samples met een thermoplastische matrix zijn deze samples steeds via thermocompressie geproduceerd. Dit komt doordat dit proces bij thermoplastische composieten de mogelijkheid geeft voor een hoge vezelvolumefractie, hoge productkwaliteit en hoge reproduceerbaarheid van de samples.

De samples uit Tabel 11 en 12 bestaan steeds uit vlasvezel waarbij de matrix opgebouwd is uit het conventioneel polymeer PP of uit biopolymeren PLA of PA11. Voor de mechanische eigenschappen te vergelijken is het belangrijk om te vermelden dat deze samples niet zijn opgebouwd met dezelfde weefselstructuur. Zowel een 1x1, 2x2 en een 4x4 weefselstructuur komen voor. De mechanische eigenschappen in Tabel 12 tonen een grote variatie. Deze variatie kan deels te linken zijn met het verschil in weefselstructuur omdat de 1x1 samples lagere mechanische eigenschappen vertonen dan de 2x2 samples en het 4x4 sample de hoogste mechanische eigenschappen heeft. De verminderde krimp in de 4x4-structuur tegenover de andere structuren heeft hier deels mee te maken. Het is echter niet mogelijk om uit deze data een uitgesproken conclusie te trekken omdat naast de vezelstructuur ook de matrix verschilt. Verder is uit deze data geen direct verband op te merken tussen de mechanische eigenschappen en het matrixmateriaal.

*Tabel 9: Weefsel-biocomposieten met thermoplastische matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie  $V_f$  en gemiddelde densiteit van het biocomposiet  $\rho$ ; densiteit aangegeven met \* is theoretisch berekend met een veronderstelde densiteit van 1,4 g/cm<sup>3</sup> voor vlasvezel en 0,9 g/cm<sup>3</sup> voor PP*

Sample naam	Bron	Vezel	Matrix	Proces	$V_f$ (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Wf-Vla-PA11-53.1	[15]	Vlas	PA11	Thermocompressie	52,5	1,23
Wf-Vla-PA11-53.2	[16]	Vlas	PA11	Thermocompressie	52,5	1,23
Wf-Vla-PP-49.3	[17]	Vlas	PP	Thermocompressie	49	1,15
Wf-Vla-PP-49.4	[18]	Vlas	PP	Thermocompressie	49	1,15
Wf-Vla-PP-39.5	[6]	Vlas	PP	Thermocompressie	39	1,1*
Wf-Vla-PLA-40.6	[7]	Vlas	PLA	Thermocompressie	40	1,33

*Tabel 10: Weefsel-biocomposieten met thermoplastische matrix – weefstructuur, treksterkte  $\sigma_t$ , trekmodulus  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigmodulus  $E_{flex}$  en maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$*

Sample naam	Weef-Structuur	$\sigma_t$ (MPa)	$E_t$ (GPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\sigma_{flex}$ (MPa)	$E_{flex}$ (GPa)	$\epsilon_{flex}$ (%)
Wf-Vla-PA11-53.1	1x1	53	6,54	/	/	/	/
Wf-Vla-PA11-53.2	2x2	127	15,16	/	/	/	/
Wf-Vla-PP-49.3	1x1	69	4,572	/	/	/	/
Wf-Vla-PP-49.4	2x2	84	8,309	/	/	/	/
Wf-Vla-PP-39.5	2x2	46	5,1	/	50	4,8	/
Wf-Vla-PLA-40.6	4x4	102	13,2	/	131	7,8	/

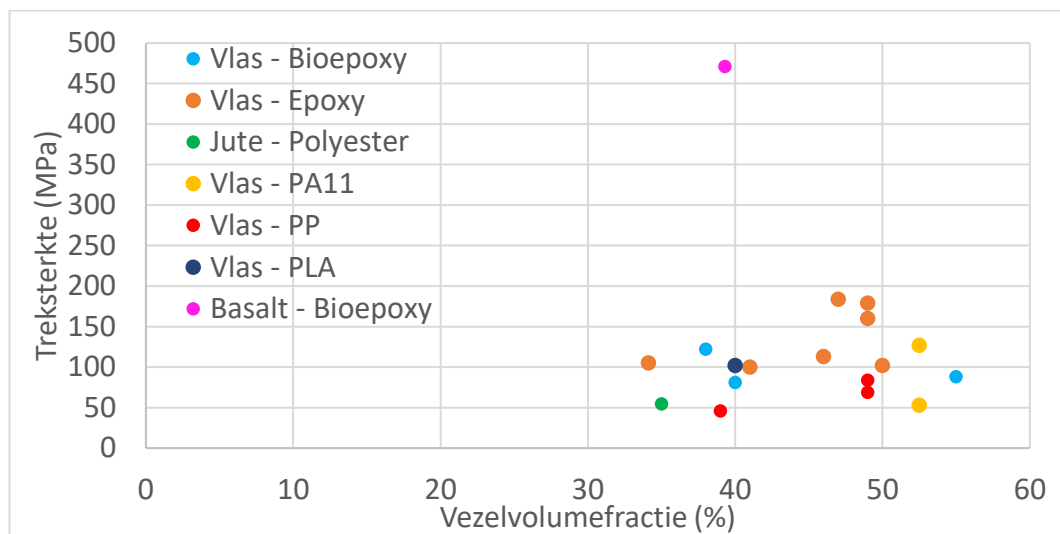
### 3.3 Vergelijking treksterkte en -stijfheid van weefsel-biocomposieten

Vanwege het belang van de treksterkte en trekstijfheid als materiaalparameter voor een product en de goede reproduceerbaarheid tijdens het testen geven Figuur 5 en 6 een overzicht van deze eigenschappen voor verschillende weefsel-biocomposieten uit Sectie 3.1 en 3.2.

Zoals eerder aangehaald in Sectie 3.1 en 3.2 en te zien in Figuur 5 en 6 vertonen de resultaten in dit hoofdstuk een grote variatie. De treksterkte van de vlasvezel-biocomposieten varieert van 46 MPa (vlas – PP) tot 184 MPa (vlas – epoxy) waarnaast de trekstijfheid varieert van 4,6 GPa (vlas – PP) tot 18,5 GPa (vlas – epoxy). Deze grote spreiding is deels te verklaren door de variatie in eigenschappen van de natuurvezels, deels door de weefstructuur (1x1, 2x2 of 4x4), deels door de vergelijking van biocomposieten die verschillende garendiktes bevatten en deels doordat de composietproductie met verschillende processen én verschillende uitvoerders is gebeurd. De eigenschappen van biocomposieten kunnen namelijk nog sterk beïnvloed worden tijdens de verwerking ervan.

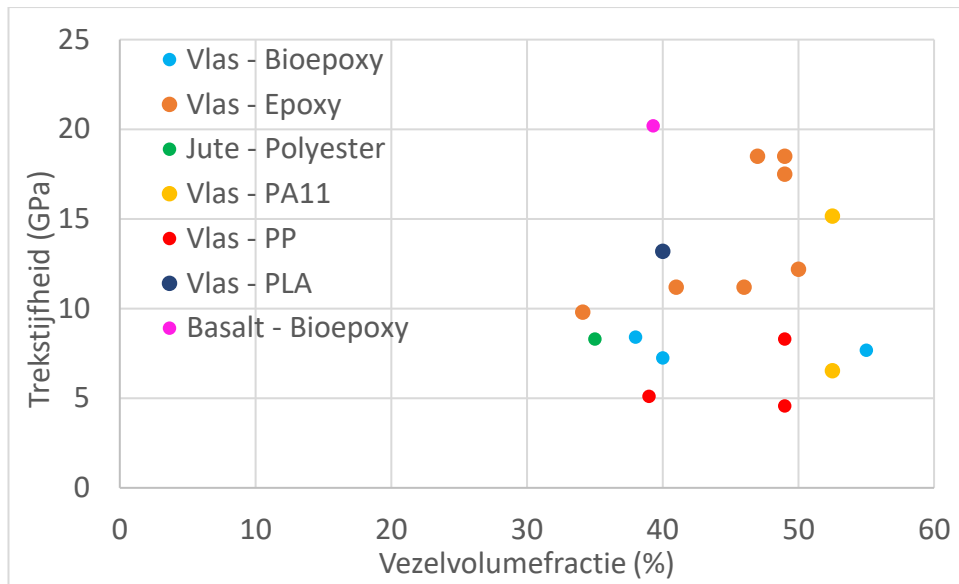
Het biocomposiet dat de hoogste eigenschappen vertoont is het basalt-bioepoxy sample. Vooral in sterkte is het verschil met de vlas- en jute-biocomposieten groot. Ook de stijfheid van dit sample is het hoogst, al is het stijfheidsverschil relatief beperkt tegenover het sterkteverschil.

Voor de vlasvezel-biocomposieten vertonen over het algemeen vlas-epoxy en vlas-PLA de beste resultaten binnen de huidige vergelijking als de sterkte en stijfheid ten opzichte van de vezelvolumefractie vergeleken worden.



Figuur 5: Vergelijking treksterkte biocomposieten met weefsel-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie





Figuur 6: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten met weefsel-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie

## 4 Biocomposieten uit non-woven vezelstructuur

Dit hoofdstuk toont, bespreekt en vergelijkt de mechanische eigenschappen van biocomposieten met non-woven-vezelstructuur. Om een voorbeeld te geven hoe een non-woven-vezelstructuur er kan uitzien toont Figuur 7 een voorbeeld van non-woven vlasvezels.

In dit hoofdstuk bespreekt Sectie 4.1 de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een thermohardende matrix. De biocomposieten die in deze sectie worden vergeleken zijn opgebouwd uit vlas-UP, vlas-epoxy en basalt-bioepoxy en geproduceerd via vacuüminfusie. Verder bespreekt Sectie 4.2 de mechanische eigenschappen van biocomposieten met een thermoplastische matrix bestaande uit vlasvezel met een matrix uit biopolymeren PLA of PHA, fossiel en biodegradeerbaar polymeer PBS of conventioneel polymeer PP.

Vanwege het belang van de treksterkte en trekstijfheid als materiaalparameter voor een product en de goede reproduceerbaarheid tijdens het testen toont Sectie 4.3 twee grafieken die een overzicht van deze parameters geven voor biocomposieten. Deze grafieken tonen welke sterkte- en stijfheidswaarden kunnen verwacht worden, wat de relatie is met de vezelvolumefractie en welke vezel en matrix de hoogste waarden bekomen bij biocomposieten met een non-woven-vezelarchitectuur.



Figuur 7: Non-woven vlasvezels [19]

### 4.1 Thermohardende matrix

Tabel 15 en 16 geven een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten uit non-woven-vezels met een thermohardende matrix, beiden geven dezelfde samples weer. De sample benaming is via afkortingen opgebouwd als volgt:

Vezelstructuur – vezeltype – matrixtype – vezelvolumefractie . samplenummer in deze tabel

Een non-woven-vezelstructuur is opgebouwd uit korte vezels die door elkaar liggen in verschillende (willekeurige) richtingen. Volledig willekeurig is dit echter niet doordat na productie een licht oriëntatieverschil aanwezig is in de machinerichting (MD) en loodrecht

op de machinerichting, de cross direction (CD). Dit verschil is soms ook opgemeten in de materiaalkarakterisering. Indien dit het geval is, maakt Tabel 16 dit onderscheid.

De vezelvolumefracties in deze samples zijn relatief laag, dit zorgt voor een limitatie in de mechanische eigenschappen. Voor de vergelijking in mechanische eigenschappen toont Tabel 16 dat het basalt-bioepoxy sample ondanks de lage vezelvolumefractie de hoogste sterkte en stijfheid vertoont met een sterkte die bijna dubbel zo hoog is en een stijfheid die 1-2 GPa hoger is dan de vlasvezel-biocomposieten. De vlasvezel-composieten met een epoxy en onverzadigd polyester matrix vertonen vergelijkbare sterkte- en stijfheidsresultaten als de maximale eigenschappen van sample NW-Vla-UP-34.1 vergeleken worden. De opsplitsing in eigenschappen bij het vlas-UP sample in de machinerichting (MD) en loodrechte richting (CD) toont namelijk een duidelijk verschil in eigenschappen.

Tabel 11: Non-woven-biocomposieten met thermohardende matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal, vezelvolumefractie  $V_f$  en gemiddelde densiteit van het biocomposiet  $\rho$ ; densiteit aangegeven met \* is theoretisch berekend met een veronderstelde densiteit van  $1,4 \text{ g/cm}^3$  voor vlasvezel,  $2,67 \text{ g/cm}^3$  voor basaltvezel,  $1,1 \text{ g/cm}^3$  voor epoxy en  $1,1 \text{ g/cm}^3$  voor bioepoxy

Sample naam	Bron	Vezel	Matrix	Proces	$V_f$ (%)	$\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )
NW-Vla-UP-34.1	[20]	Vlas	Onverzadigd polyester	Vacuüminfusie	34	1,29
NW-Vla-Ep-36.2	[9]	Vlas	Epoxy	Vacuüminfusie	35,5	1,21*
NW-Bas-Bep-20.3	[13]	Basalt	Bioepoxy	RTM	20,4	1,42*

Tabel 12: Non-woven-biocomposieten met thermohardende matrix – treksterkte  $\sigma_t$ , trekmodulus  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigmodulus  $E_{flex}$ , maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$  en ILSS

Sample naam	$\sigma_t$ (MPa) MD/CD	$E_t$ (GPa) MD/CD	$\epsilon_t$ (%) MD/CD	$\sigma_{flex}$ (MPa) MD/CD	$E_{flex}$ (GPa) MD/CD	$\epsilon_{flex}$ (%) MD/CD	ILSS (MPa)
NW-Vla-UP-34.1	54 / 81	5,9 / 8,0	1,53 / 1,68	95 / 130	5,7 / 7,5	2,34 / 2,33	/
NW-Vla-Ep-36.2	84	7,4	1,59	121	5,5	2,68	/
NW-Bas-Bep-20.3	134,5	8,9495	1,9	207	7,865	2,9	43,65

## 4.2 Thermoplastische matrix

Tabel 17 en 18 geven een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten uit non-woven-vezels met een thermoplastische matrix, beiden geven dezelfde samples weer. De sample benaming is via afkortingen opgebouwd als volgt:

Vezelstructuur – vezeltype – matrixtype – vezelvolumefractie . samplenummer in deze tabel

Een non-woven-vezelstructuur is opgebouwd uit korte vezels die door elkaar liggen in verschillende (willekeurige) richtingen. Volledig willekeurig is dit echter niet doordat na productie een licht oriëntatieverschil aanwezig is in de machinerichting (MD) en loodrecht op de machinerichting, de cross direction (CD). Dit verschil is soms ook opgemeten in de materiaalkarakterisering. Indien dit het geval is, maakt Tabel 18 dit onderscheid.

Zoals ook de UD- en weefselsamples met een thermoplastische matrix zijn deze samples steeds via thermocompressie geproduceerd. Dit komt doordat dit proces bij thermoplastische composieten de mogelijkheid geeft voor een hoge vezelvolumefractie, hoge productkwaliteit en hoge reproduceerbaarheid van de samples.

De samples vergeleken in Tabel 17 en 18 bestaan steeds uit vlasvezel met een non-woven structuur. De parameters die variëren zijn de vezelvolumefractie en de gebruikte matrix. De matrix bestaat uit biopolymeren PLA of PHA, fossiel en biodegradeerbaar polymeer PBS of conventioneel polymeer PP. De mechanische eigenschappen van de samples met een PLA matrix vertonen een grote spreiding. PHA geeft relatief goede eigenschappen, PP en PBS komen lagere eigenschappen uit. De vergelijking van PHA, PP en PBS is echter moeilijk te maken omdat telkens maar één onderzoeksresultaat wordt vergeleken.

Over het algemeen kan gezegd worden dat deze composieten een treksterkte tussen 50 en 100 MPa en een trekstijfheid tussen 7 en 16 GPa vertonen.

De variatie in eigenschappen is volledig te zien in de opsplitsing van de eigenschappen bij sample NW-Vla-PLA-47.2 in de machine richting (MD) en loodrechte richting (CD). Dit onderzoeksresultaat toont namelijk een groot verschil in eigenschappen in de MD en CD richting van het non-woven biocomposiet.

Tabel 13: Non-woven-biocomposieten met thermoplastische matrix – bron van de mechanische eigenschappen, vezeltype, matrixtype, productieproces tot plaatmateriaal en vezelvolumefractie  $V_f$

Sample naam	Bron	Vezel	Matrix	Proces	$V_f$ (%)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
NW-Vla-PLA-37.1	[21]	Vlas	PLA	Thermocompressie	37	1,30
NW-Vla-PLA-47.2	[22]	Vlas	PLA	Thermocompressie	47	1,32
NW-Vla-PLA-30.3	[23]	Vlas	PLA	Thermocompressie	30	1,29
NW-Vla-PHA-30.4	[23]	Vlas	PHA	Thermocompressie	30	1,30
NW-Vla-PBS-30.5	[23]	Vlas	PBS	Thermocompressie	30	1,12
NW-Vla-PP-30.6	[23]	Vlas	PP	Thermocompressie	30	1,05

Tabel 14: Non-woven-biocomposieten met thermoplastische matrix – treksterkte  $\sigma_t$ , trekstijfheid  $E_t$ , maximale rek in trek  $\epsilon_t$ , buigsterkte  $\sigma_{flex}$ , buigstijfheid  $E_{flex}$  en maximale buigrek  $\epsilon_{flex}$

Sample naam	$\sigma_t$	$E_t$	$\epsilon_t$	$\sigma_{flex}$	$E_{flex}$	$\epsilon_{flex}$
	(MPa) MD/CD	(GPa) MD/CD	(%) MD/CD	(MPa) MD/CD	(GPa) MD/CD	(%) MD/CD
NW-Vla-PLA-37.1	54,3	7,4	1,5	/	/	/
NW-Vla-PLA-47.2	106,3 / 48,7	15,9 / 7,3	1 / 1,1	140 / 90,1	7,6 / 5,0	2,5 / 2,5
NW-Vla-PLA-30.3	90,4	13,16	1	/	/	/
NW-Vla-PHA-30.4	82,4	10,27	1,5	/	/	/
NW-Vla-PBS-30.5	67,5	7,271	1,4	/	/	/
NW-Vla-PP-30.6	58,4	8,22	1,2	/	/	/

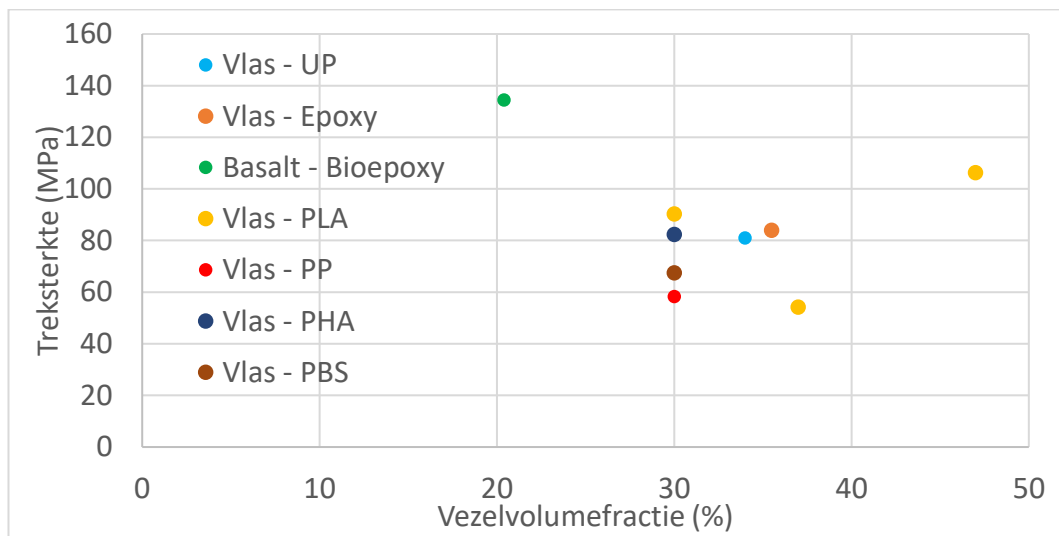
### 4.3 Vergelijking treksterkte en -stijfheid non-woven-biocomposieten

Vanwege het belang van de treksterkte en trekstijfheid als materiaalparameter voor een product en de goede reproduceerbaarheid tijdens het testen geven Figuur 8 en 9 een overzicht van deze eigenschappen voor verschillende non-woven-biocomposieten uit Sectie 4.1 en 4.2.

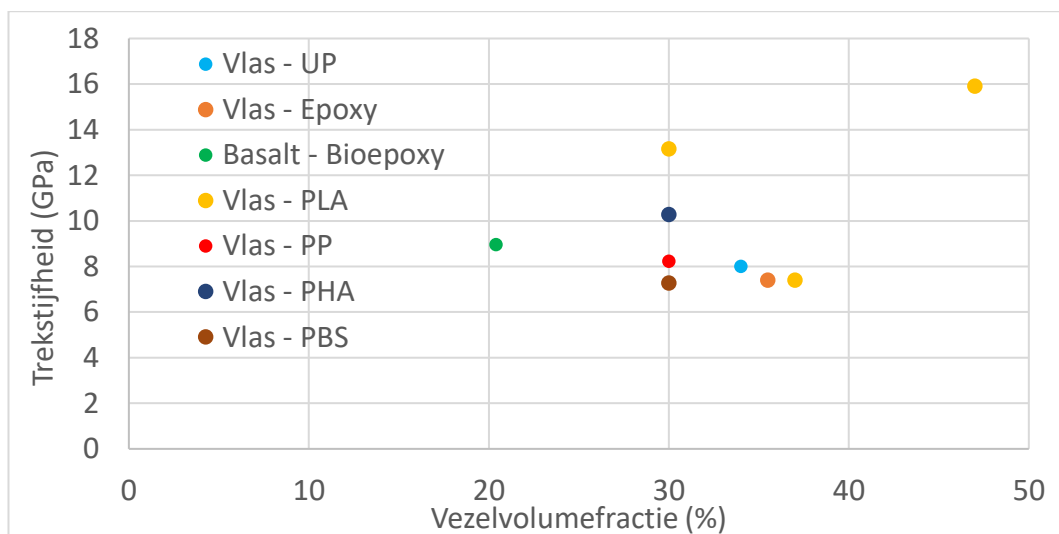
De vorige secties maken voor samples NW-Vla-UP-34.1 en NW-Vla-PLA-47.2 het onderscheid tussen eigenschappen in de machinerichting en loodrecht op de machinerichting. Onderzoeksresultaat NW-Vla-UP-34.1 toont de hoogste stijfheid en sterkte loodrecht op de machinerichting terwijl onderzoeksresultaat NW-Vla-PLA-47.2 de hoogste waarden weergeeft in de machinerichting. Voor de vergelijking in Figuur 8 en 9 is gebruik gemaakt van de maximale waarden van deze onderzoeksresultaten.

Figuur 8 en 9 bevestigen dat het basalt-bioepoxy sample tegenover de vlasvezelresultaten vooral betere sterkte-eigenschappen geeft. Vergelijking op vlak van stijfheid geeft aan dat het basalt-sample een vergelijkbare stijfheid bekomt tegenover de beste resultaten van vlas-PLA samples wanneer een lineaire stijging bij een hogere vezelvolumefractie verondersteld wordt.

Verder vertonen de vlas-composieten een grote variatie in sterkte en stijfheid. De treksterkte varieert van 54,3 (vlas-PLA) tot 106,3 MPa (vlas-PLA) en de trekstijfheid geeft waarden tussen 7,3 (vlas-PBS) en 15,9 GPa (vlas-PLA) aan. Deze grote spreiding is deels te verklaren door de variatie in eigenschappen van de natuurvezels, deels door de vergelijking van biocomposieten die verschillende garendiktes bevatten en deels doordat de composietproductie met verschillende processen én door verschillende uitvoerders is gebeurd. De eigenschappen van biocomposieten kunnen namelijk nog sterk beïnvloed worden tijdens de verwerking ervan.



Figuur 8: Vergelijking treksterkte biocomposieten met non-woven-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie



Figuur 9: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten met non-woven-vezelarchitectuur in functie van de vezelvolumefractie

## 5 Vergelijking van de sterkte en stijfheid voor vlasvezel-biocomposieten

Hoofdstuk 2,3 en 4 tonen de mechanische eigenschappen van biocomposieten met telkens een verschillende vezelarchitectuur. In deze resultaten komen vooral onderzoeksresultaten aan bod met vlasvezels als de versterkende vezel. Dit komt door de hoge commerciële beschikbaarheid van vlasvezels en omdat hierrond veel data te verkrijgen is. Hierdoor toont dit hoofdstuk een overzicht van de treksterkte- en trekstijfheidsresultaten van de getoonde vlasvezelcomposieten in de eerdere hoofdstukken.

Uit de eerdere hoofdstukken blijkt dat de eigenschappen van de verschillende biocomposieten sterk varieert vanwege de invloed van o.a. vezel- en matrixtype, vezelvolumefractie, productiemethode, productie uitvoering en de testomgeving. De oplistings van de minimale en maximale waarde voor de treksterkte en -stijfheid voor elke vezelarchitectuur bekomt het volgende resultaat:

Treksterkte:

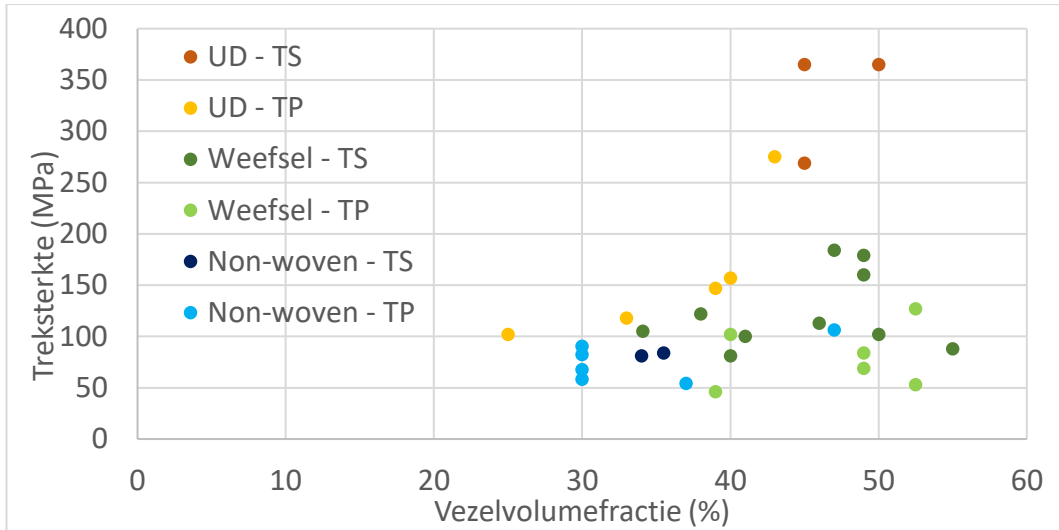
- Non-woven: min. 54,3 MPa (PLA- $V_f=37\%$ ) max. 106,3 MPa (PLA- $V_f=47\%$ )
- Weefsel : min. 46 MPa (PP- $V_f=39,5\%$ ) max. 184 MPa (Epoxy- $V_f=47\%$ )
- UD : min. 102 MPa (PP- $V_f=37\%$ ) max. 365 MPa (Epoxy- $V_f=47\%$ )

Trekstijfheid:

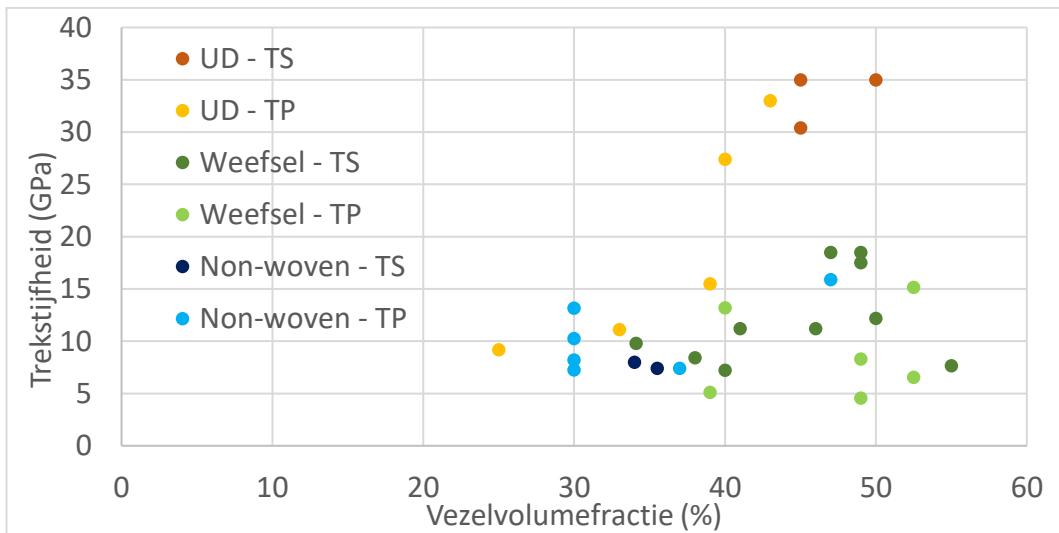
- Non-woven: min. 7,3 GPa (PBS- $V_f=30\%$ ) max. 15,9 GPa (PLA- $V_f=47\%$ )
- Weefsel : min. 4,6 GPa (PP- $V_f=49\%$ ) max. 18,5 GPa (Epoxy- $V_f=47\%$ )
- UD : min. 9,2 GPa (PP- $V_f=25\%$ ) max. 35 GPa (Epoxy- $V_f=45\%$ )

Deze oplistings toont dat, zoals verwacht, voor de maximale waarden een non-woven-vezelstructuur de laagste waarde bekomt en een UD-vezelstructuur de hoogste waarde bekomt. Ook bij de minimale waarden toont een UD-vezelstructuur de hoogste waarde. De minimale waarde van de weefsel-vezelstructuur is echter lager dan deze van de non-woven-vezelstructuur. Dit is niet zoals verwacht vanwege de niet-continue vezels in de non-woven-structuur en beter gealigneerde vezels in de weefsel-structuur.

Figuur 10 en 11 tonen het volledige overzicht van de treksterkte- en trekstijfheidsresultaten uit de vorige hoofdstukken. Dit overzicht toont dat non-woven-biocomposieten over het algemeen een lagere vezelvolumefractie kunnen bekomen dan UD- of weefsel-biocomposieten. Ondanks de lagere vezelvolumefractie tonen de non-woven-biocomposieten vergelijkbare eigenschappen met verschillende weefsel-biocomposieten. De resultaten van de UD-biocomposieten tonen dat met deze vezelstructuur de hoogste treksterkte en -stijfheid kan bereikt worden. Voor deze composieten schalen de eigenschappen mee met de vezelvolumefractie met een relatief kleine variatie.



Figuur 10: Vergelijking treksterkte biocomposieten uit vlasvezel met verschillende vezelarchitecturen in functie van de vezelvolumefractie



Figuur 11: Vergelijking trekstijfheid biocomposieten uit vlasvezel met verschillende vezelarchitecturen in functie van de vezelvolumefractie

## 6 Zelfversterkte biopolymeren

(Bio)polymeren kunnen niet alleen versterkt worden door vezels uit planten of mineralen, het is ook mogelijk om zelfversterkte biopolymeren te maken. Zoals uitgelegd in Leverbaarheid 4.1 'Rapport omtrent hoge sterkte PLA-filamenten en -tapes voor SRPC' kan bij een laagsmeltende PLA-grade, die als matrix dient, een hoogsmeltende PLA-grade toegevoegd worden als versterkende vezel in filament- of tapevorm.

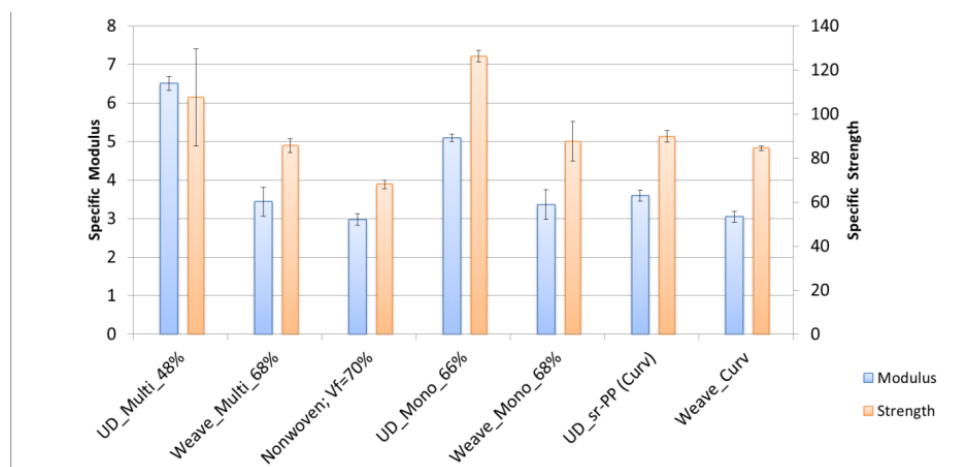
Eerder onderzoek door Sirris en Centexbel heeft de buigsterkte en -stijfheid onderzocht van SR-PLA met een UD- of weefselvezelversterking uit mono- en multifilamenten. Hierbij bestaan de monofilamenten enkel uit hoogsmeltend PLA en zijn de multifilamenten een mengeling van hoogsmeltende en laagsmeltende filamenten. De specifieke trek- en buigeigenschappen eigenschappen zijn hierbij vergeleken met Curv-materiaal uit SR-PP, maar de impactweerstand is typisch lager.

Figuur 12 toont de specifieke modulus ( $\text{GPa} / \text{g/cm}^3$ ) en sterkte ( $\text{MPa} / \text{g/cm}^3$ ) waarbij een dichtheid van  $1,24 \text{ g/cm}^3$  verondersteld wordt voor PLA.

Uit deze resultaten blijkt dat UD-multifilament PLA, met een vezelvolumefractie van 48%, de hoogste stijfheid behaalt met een waarde van +- 8 GPa. Het mono en multi weefsel-PLA, met een vezelvolumefractie van 68%, toont een stijfheid van +-4,34 GPa en het non-woven PLA, met een vezelvolumefractie van 70%, toont een stijfheid van +- 3,72 GPa. Hieruit blijkt dat een verbetering van de stijfheid van niet versterkt PLA, +- 3,5 GPa, mogelijk is. [24]

Op vlak van sterkte blijkt uit de resultaten dat UD-monofilament PLA, met een vezelvolumefractie van 66%, de hoogste sterkte behaalt met een waarde van +- 155 MPa. Het weefsel-mono en weefsel-multi PLA, met een vezelvolumefractie van 68%, toont een sterkte van +-105 MPa en het non-woven PLA, met een vezelvolumefractie van 70%, toont een stijfheid van +- 86,8 MPa. Hieruit blijkt dat een verbetering van de sterkte van niet-versterkt PLA, +- 50 MPa, mogelijk is. [24]

Deze sterktes en stijfheden zijn vergelijkbaar (iets lager of iets hoger) met de minimale waarden bereikt met vlasvezel. Het hangt af van de toepassing om te zeggen welk biocomposiet het meest geschikt is.



Figuur 12: Specifieke buigsterkte ( $\text{MPa} / \text{g/cm}^3$ ) en -stijfheid ( $\text{GPa} / \text{g/cm}^3$ ) van SR-PLA met UD of weefsel uit mono- en multifilamenten vergeleken met SR-PP. Als dichtheid voor PLA wordt de waarde  $1,24 \text{ g/cm}^3$  genomen. [24]



## 7 Conclusie

Dit verslag geeft een overzicht van de mechanische eigenschappen van biocomposieten als 2D-plaatmateriaal.

Hoofdstuk 1 overloopt de teststandaarden waarmee de testresultaten voor de trek-, buig-, compressie-, interlaminaire afschuifeigenschappen en afschuifeigenschappen in het vlak zijn gegenereerd. Meestal werd door de onderzoekers een ISO-standaard gevolgd. Voor deze standaardtesten is er een parallelle ISO- en ASTM-standaard die beiden gebruikt kunnen worden.

De resultaten voor UD-biocomposiet in Hoofdstuk 2 tonen aan dat voor deze materialen over het algemeen de treksterkte en -stijfheid toenemen bij stijgende vezelvolumefractie. De vergelijking tussen vlas- en hennepvezel leert dat de hennepvezelcomposieten in dezelfde range zitten als vlasvezelcomposieten bij een gelijkaardige vezelvolumefractie. Voor de vergelijking tussen de matrices kan gezegd worden dat vlas-epoxy samples een hoge vezelvolumefractie en hierbij ook een hoge stijfheid en sterkte kunnen bekomen.

Hiernaast tonen de resultaten voor weefsel-biocomposiet in Hoofdstuk 3 een grote variatie in mechanische eigenschappen. Zo varieert de treksterkte van de vlasvezel-biocomposieten van 46 MPa (vlas – PP) tot 184 MPa (vlas – epoxy) waarnaast de trekstijfheid varieert van 4,6 GPa (vlas – PP) tot 18,5 GPa (vlas – epoxy).

De resultaten voor non-woven-biocomposiet uit Hoofdstuk 4 tonen evenwel een grote variatie in mechanische eigenschappen. De treksterkte varieert van 54,3 (vlas-PLA) tot 106,3 MPa (vlas-PLA) en de trekstijfheid geeft waarden tussen 7,3 (vlas-PBS) en 15,9 GPa (vlas-PLA) aan.

Deze grote spreiding in hoofdstuk 3 en 4 is deels te verklaren door de variatie in eigenschappen van de natuurvezels, deels door de weefstructuur (1x1, 2x2 of 4x4), deels door de vergelijking van biocomposieten die verschillende garendiktes bevatten en deels doordat de composietproductie met verschillende processen en door verschillende uitvoerders is gebeurd.

Resultaten voor biocomposieten in Hoofdstuk 3 en 4 met basaltvezels tonen de hoogste mechanische eigenschappen met vooral een hoge sterkte tegenover plantvezels.

Het totaaloverzicht van vlasvezel-biocomposieten uit Hoofdstuk 5 toont dat non-woven-biocomposieten over het algemeen een lagere vezelvolumefractie kunnen bekomen dan UD- of weefsel-biocomposieten. Ondanks de lagere vezelvolumefractie tonen de non-woven-biocomposieten vergelijkbare eigenschappen met verschillende weefsel-biocomposieten. De resultaten van de UD-biocomposieten tonen dat met deze vezelstructuur de hoogste treksterkte en -stijfheid kan bereikt worden.

Uit Hoofdstuk 6 volgt dat voor zelfversterkte PLA composieten de sterktes en stijfheden vergelijkbaar zijn (iets lager of iets hoger) met de minimale waarden bereikt met vlasvezel. Uit de vergelijking met zelfversterkte PP composieten volgt dat PLA qua stijfheid en sterkte stijfheid een goed alternatief kan zijn. Het materiaal is wel een stuk brosser dan zelfversterkte polypropyleen.

## 8 Referenties

- [1] easycomposites, "50g Unidirectional Flax Fibre Tape (400mm)," [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/50g-unidirectional-flax-fibre-tape>.
- [2] S. Réquillé, B. Mazian, M. Grégoire, S. Musio and M. Gautreau, "Exploring the dew retting feasibility of hemp in very contrasting European environments: Influence on the tensile mechanical properties of fibres and composites," *Industrial Crops*, vol. 164, 2021.
- [3] Eco-Technilin, "TECHNICAL DATA SHEET - FLAXPREG T-UD," VALLIQUERVILLE, 2021.
- [4] Eco-Technilin, "TECHNICAL DATA SHEET - FLAXTAPE™," VALLIQUERVILLE, 2021.
- [5] Composites Evolution, "Technical Data Sheet Evopreg Medium temperature cure flax epoxy prepregs for component," Chesterfield, 2021.
- [6] BPREG, "Technical Sheet - high-performing lightweight affordable natural-fiber composite solutions," 2022.
- [7] Scabro, "Biotex Flax/PLA 4x4 Plain Weave 500g/m<sup>2</sup> Fabric Technical Data Sheet," 2013.
- [8] E. Munoz and J. Garcia-Manrique, "Water absorption behaviour and its effect on the mechanical properties of flax fibre reinforced bioepoxy composites," *International Journal of Polymer Science*, 2015.
- [9] Procotex; Sirris, "Tensile testing, Flexural testing, Impact testing and Vibration testing of composites," 2015.
- [10] Eco-Technilin, "Technical datasheet FLAXDRY BL200," VALLIQUERVILLE, 2021.
- [11] Eco-Technilin, "Technical datasheet 2017 FLAXDRY BL300," VALLIQUERVILLE, 2017.
- [12] Eco-Technilin, "Technical datasheet FLAXDRY BL550," VALLIQUERVILLE, 2021.
- [13] Centexbel, 2020.
- [14] Composites Evolution Ltd, "Biotex Jute Fabrics," Chesterfield, 2013.
- [15] DEHONDT Composites, "Twinflax P-Preg PA11 500," PORT JEROME SUR SEINE, 2018.
- [16] DEHONDT Composites, "NATTEX P-Preg sergé 2/2 PA11 900," PORT JEROME SUR SEINE, 2018.
- [17] DEHONDT Composites, "TWINFLAX P-Preg PP 500," PORT JEROME SUR SEINE, 2019.
- [18] DEHONDT Composites, "NATTEX P-Preg sergé 2/2 PP 900," PORT JEROME SUR SEINE, 2019.
- [19] easycomposites, "450g Non-Woven Flax Fibre Mat (1000mm)," [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/500g-non-woven-flax-fibre-mat>.
- [20] Eco-Technilin, "Technical Datasheet : NON WOVEN MAT".
- [21] D. Pantaloni, A. Melelli, D. U. Shah, C. Baley and A. Bourmaud, "Influence of water ageing on the mechanical properties of flax/PLA non-woven composites," *Polymer degradation and stability*, vol. 200, p. 109957, 2022.
- [22] M. Gautreau, A. Kervoelen, G. Barteau, F. Delattre, T. Colinart, F. Pierre, M. Hauguel, N. Le Moigne, F. Guillon, A. Bourmaud and J. Beaugrand, "Fibre individualisation and

- mechanical properties of a flax-PLA non-woven composite following physical pre-treatments," *Coatings (Basel)*, vol. 11, no. 7, p. 846, 2021.
- [23] D. Pantaloni, D. Shah, C. Baley and A. Bourmaud, "Monitoring of mechanical performances of flax non-woven biocomposites during a home compost degradation," *Polymer degradation and stability*, vol. 177, pp. 109-166, 2020.
- [24] L. D. Vriese, "Bio-SRPC, WP 3: Consolidation and thermoforming processes," 2015.
- [25] D. Pantaloni, L. Ollier, D. Shah, C. Baley, E. Rondet and A. Bourmaud, "Can we predict the microstructure of a non-woven flax/PLA composite through assessment of anisotropy in tensile properties?," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 218, p. 109173, 2022.
- [26] Flax Technic Groupe DEHONDT, "PRODUITS NATTEX® Roving," 2014.
- [27] Y. G. T. G., . A., . P., . Kushvaha, . M. R. and . Siengchin, "A new study on flax-basalt-carbon fiber reinforced epoxy/bioepoxy hybrid composites," *Polymer Composites*, vol. 42, no. 4, pp. 1891-1900, 2021.
- [28] Basaltex, "Basaltex woven fabrics," [Online]. Available: <https://www.basaltex.com/products/woven-fabrics>.