



BREPLA

Biobased fibre REinforced PLAstics

Leverbaarheid 1.2.1

Benchmark studie: aandachtspunten ten opzichte van gangbare materialen

Sirris | Wannes Lembrechts - Linde De Vriese
wannes.lembrechts@sirris.be - 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: Vergelijking vezeldwarsdoorsnede natuurvezel (vlasvezel), A [7], en glasvezel, B [8]	7
Figuur 2: Vergelijking CO ₂ -uitstoot vezels voor een scenario tot de vezels de fabriek verlaten, exclusief het transport naar de klant [9], [10]	8
Figuur 3: Vergelijking SEM foto's van onbehandelde vlasvezels (a) en alkali behandelde vlasvezels (b) [7]	9
Figuur 4: Overzicht polymeren in categorieën volgens fossiele of natuurlijke oorsprong en bioafbreekbaarheid, conventionele polymeren zijn fossiel gebaseerd en niet-bioafbreekbaar [27]	14
Figuur 5: Vergelijking uitstoot broeikasgassen uitgedrukt in procent voor de productie van fossiel gebaseerde en hennepvezel composieten [29]	19
Figuur 6: Vergelijking energiebehoefte uitgedrukt in procent voor de productie van fossiel gebaseerde en hennepvezel composieten [29].....	19

Lijst van tabellen

Tabel 1: Eigenschappen van natuurlijke vezels vergeleken met glasvezels [3], kevlar vezels [4] en koolstofvezels.....	5
Tabel 2: prijsvergelijking 200g 2x2 twill woven cloth uit verschillende vezeltypes [14].....	10
Tabel 3 : Prijsvergelijking weefsels naast de mechanische eigenschappen [3], [4], [14].....	11
Tabel 4 : Vergelijking milieu-impact en prijs van fossiel gebaseerde en bio-gebaseerde kunststoffen, industriële biodegradatie is berekend volgens EN 13432 of ASTM D6400, degradatie in oceaan is referentie gebaseerd [27].....	15
Tabel 5 : Vergelijking dempingskarakteristieken voor testsamples met gelijkaardige resonantiefrequentie, opgebouwd uit weefsels met verschillende vezeltypes en geïnfuseerd met epoxy hars via vacuüminfusie	20

Inhoudstafel

1	Introductie	4
2	Vergelijking op vezelniveau	5
2.1	Mechanische eigenschappen.....	5
2.1.1	Garen twist bij natuurlijke vezels	6
2.1.2	Variatie in dwarsdoorsnede bij natuurlijke vezels	6
2.2	Natuurlijke oorsprong	7
2.2.1	Vergelijking in CO ₂ -uitstoot.....	7
2.2.2	Reiniging akkerbodem.....	8
2.3	Akoestische en mechanische demping.....	8
2.4	Vezel-matrix hechting	9
2.5	Maximale procestemperatuur	10
2.6	Prijsvergelijking.....	10
3	Vergelijking op matrixniveau	12
3.1	Biopolymeren in het algemeen	12
3.2	PLA	12
3.3	Biodegradatie.....	13
4	Vergelijking op composiet-/eindproductniveau	16
4.1	Aandachtspunten tijdens verwerking tot eindproduct.....	16
4.2	Duurzaamheid bij biocomposieten*.....	16
4.2.1	Vermindering broeikasgassen en energieverbruik	18
4.3	Gebruik van coatings.....	20
4.4	Vergelijking dempingseigenschappen voor (bio)composieten	20
5	Conclusie	22
6	Referenties	23

1 Introductie

Leverbaarheid 1.1.1, 'Productvereisten voor 3 sectoren', beschrijft hoe bedrijven meer en meer innoveren met biocomposieten die bestaan uit biopolymeren en/of natuurlijke vezels. Ondanks dat deze markt groeit, blijft veelvuldig gebruik voorlopig uit.

Volgens de '*Diffusion of innovations*'-theorie van professor in de communicatie wetenschappen Everett Rogers is de groei van innovatie te herleiden naar vijf factoren: complexiteit, testbaarheid, communiceerbaarheid, compatibiliteit en het relatieve voordeel. [1] [2]

Om te beginnen is het belangrijk om de complexiteit van het werken met biocomposieten te verkleinen. Een moeilijkheid voor biocomposieten is dat veel kennis gecentraliseerd zit bij bepaalde instanties. Het huidige BREPLA-project is bedoeld om deze kennis breder te verspreiden naar de volledige industrie.

Om innovatie met biocomposieten te doen slagen, is het belangrijk dat de testbaarheid hoog genoeg is. België en Frankrijk hebben een rijke geschiedenis in de vlasteelt, dit is een van de redenen waarom momenteel vooral met vlasvezel wordt gewerkt in Europese biocomposiet applicaties.

Dit verslag focust vooral op het relatieve voordeel en de mate van compatibiliteit van biocomposieten ten opzichte van de conventionele composieten. Deze aspecten worden uitgewerkt op vezelniveau, matrixniveau en composiet-/eindproductniveau.

Vragen zoals 'Wat is het verschil op vlak van mechanische - en dempingseigenschappen?' en 'Hoe zit het met de afbreekbaarheid en recycleerbaarheid van deze materialen/producten?', 'Waarop moet gelet worden tijdens het verwerkingsproces?' komen aan bod.

Dit verslag bouwt verder op verslagen D 1.1.1, D 2.1, D 2.2 en D 3.1 waar een overzicht wordt gegeven van de typische toepassingen voor biocomposieten, de natuurlijke vezels en de beschikbare thermoharders en thermoplasten.

2 Vergelijking op vezelniveau

2.1 Mechanische eigenschappen

Binnen dit project geeft verslag D 2.1 een overzicht van de verschillende natuurlijke vezels en de mechanische eigenschappen hiervan. In Tabel 1 staat de vergelijking in mechanische eigenschappen van de natuurvezels met glasvezels opnieuw opgelijst met hieraan de eigenschappen van kevlar vezels en koolstofvezels toegevoegd.

Tabel 1: Eigenschappen van natuurlijke vezels vergeleken met glasvezels [3], kevlar vezels [4] en koolstofvezels

Fiber	Density (g/cm ³)	Failure strain (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Specific Young's modulus (GPa/g cm ³)	moisture absorption (%)
Ramie	1,5	2	500	44	29	12-17
Flax	1,4	1,2-1,06	800-1500	60-80	43-57	7
Hemp	1,48	1,6	550-900	70	47	8
Jute	1,46	1,8	400-800	10-30	7-21	12
Sisal	1,33	2-3	600-700	38	29	11
Cotton	1,51	3-10	400	12	8	8-25
Coir	1,25	15-25	220	6	5	10
Basalt	2,67	3,15	2900-3100	85-89	32-33	/
Filava mineral fiber	2,61	2,4	3400-3700	88-94	33-36	/
E-glass	2,55	2,5	2400	70	29	/

Kevlar 29 - 49	1.45	3,6 - 2,4	2900 - 3000	70 - 112	48 - 77	/
Carbon HS	1.80	0,8 - 1,9	1400 - 4900	160 - 250	89 - 139	/
Carbon IM	1.75	0,8 - 2,2	2350 - 7000	280 - 320	160 - 183	/
Carbon HM	1.80	0,5 - 1,4	1900 - 5500	340 - 440	189 - 244	/
Carbon UHM	1.90	0,4 - 0,5	1800 - 3500	440 - 830	232 - 437	/

Tabel 1 toont dat vlas en hennep zeer sterke en stijve natuurvezels zijn. Vlas- en hennepvezel hebben een vergelijkbare stijfheid als glasvezel. Vanwege de lagere densiteit van natuurvezels is de specifieke stijfheid (specific young's modulus) hierdoor met 50 GPa/g/cm³ 72 % hoger dan de specifieke stijfheid van glasvezel, die 29 GPa/g/cm³ bedraagt. Vlas- en hennepvezel zijn echter minder sterk dan glasvezel en hebben ook een hoge variabiliteit in sterkte-eigenschappen waardoor aangeraden wordt om bij het design van een eindproduct een grondige statistische analyse te doen van de beschikbare vezels en een hoge veiligheidsfactor toe te passen.

De stijfheid, densiteit en dus ook specifieke stijfheid van natuurvezels vlas en hennep zijn vergelijkbaar met Kevlar 29. Ten opzichte van Kevlar 49 zijn de stijfheid en specifieke stijfheid van vlas- en hennepvezel 35 % lager. Verder is kevlarvezel minstens dubbel zo sterk als natuurvezel.

Terwijl de mechanische eigenschappen van vlas- en hennepvezel de eigenschappen van kevlar en glasvezel enigszins benaderen, zijn de mechanische eigenschappen van koolstofvezels 2 tot 10 keer hoger. De eigenschappen van natuurvezels zijn dus niet de vergelijken met koolstofvezels.

De mechanische eigenschappen van basaltvezels zijn vergelijkbaar met glasvezel. De stijfheid en sterkte is ongeveer 20 % hoger dan bij glasvezel. Ook de dichtheid 2.67 g/cm^3 van basaltvezel is iets hoger dan de dichtheid van glasvezel en dus relatief zwaar.

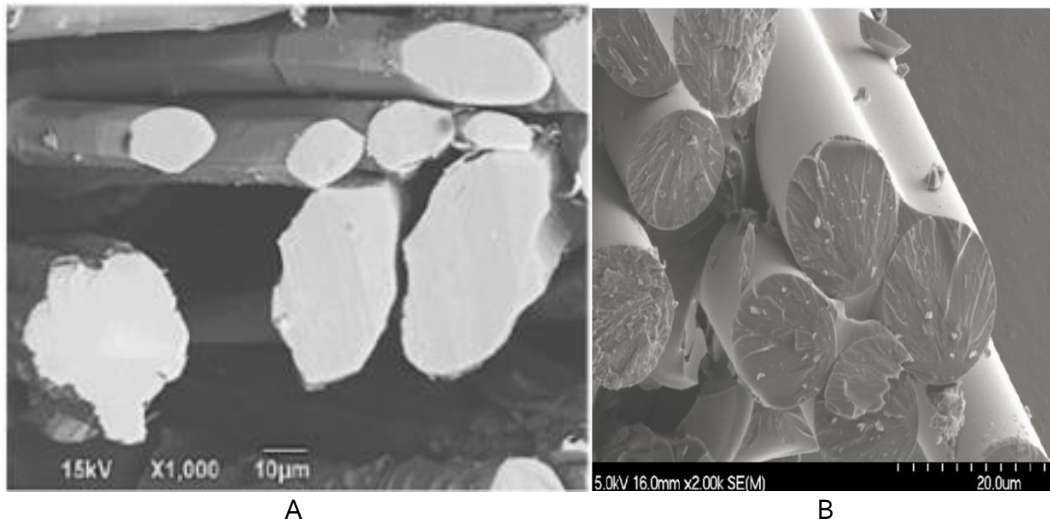
Naast een vergelijking in mechanische eigenschappen, toont Tabel 1 dat natuurvezels vocht kunnen absorberen en dat dit niet zo is bij de conventionele vezels. Minerale vezels zoals basalt kunnen geen vocht absorberen. Vochtabsorptie kan bij natuurvezels zorgen voor het kromtrekken van het product tijdens productie, slechte vezel-matrix hechting en hierdoor mindere mechanische eigenschappen. Hoofdstuk 4 'Vergelijking op composiet-/eindproductniveau' bespreekt wat gedaan kan worden in productie om vochtabsorptie in biocomposiet te voorkomen. [5]

2.1.1 Garen twist bij natuurlijke vezels

Een belangrijk verschil tussen natuurlijke vezels en synthetische vezels is dat natuurlijke vezels beperkt zijn tot een bepaalde maximale lengte. Hierdoor is een extra productiestap nodig om tot garens te komen. Voor de productie van nonwoven-materiaal is deze extra productiestap niet nodig. Om bij natuurlijke vezels tot een continue garen te komen worden de vezels getwist in een spinproces. De twist zorgt voor de connectie tussen de vezels om tot een garen te kunnen komen. De twist zorgt echter voor een kleine misoriëntatie van de vezels waardoor bij hoge twist niet optimaal gebruik gemaakt wordt van de vezelsterkte. Eenmaal verwerkt met een polymeer zijn de vezels best zo unidirectioneel mogelijk voor optimale mechanische eigenschappen in één richting. De garensterkte zelf neemt echter af bij een te lage twist waardoor garens bij een te lage twist niet meer verwerkt kunnen worden. [6]

2.1.2 Variatie in dwarsdoorsnede bij natuurlijke vezels

Een van de oorzaken van de variatie in mechanische eigenschappen bij natuurlijke vezels is de variatie in dwarsdoorsnede van de vezels. De vorm en diameter van de vezeldoorsnede kan namelijk sterk verschillen. Doorsnedes van synthetische vezels hebben echter een cirkelvorm bij constante doorsnede. Figuur 1 toont de typische doorsnedes van natuurvezels, Figuur 1 A, ten opzichte van glasvezels, Figuur 1 B. De atypische en variabele vezeldoorsnede is een van de aandachtspunten bij het werken met natuurlijke vezels.



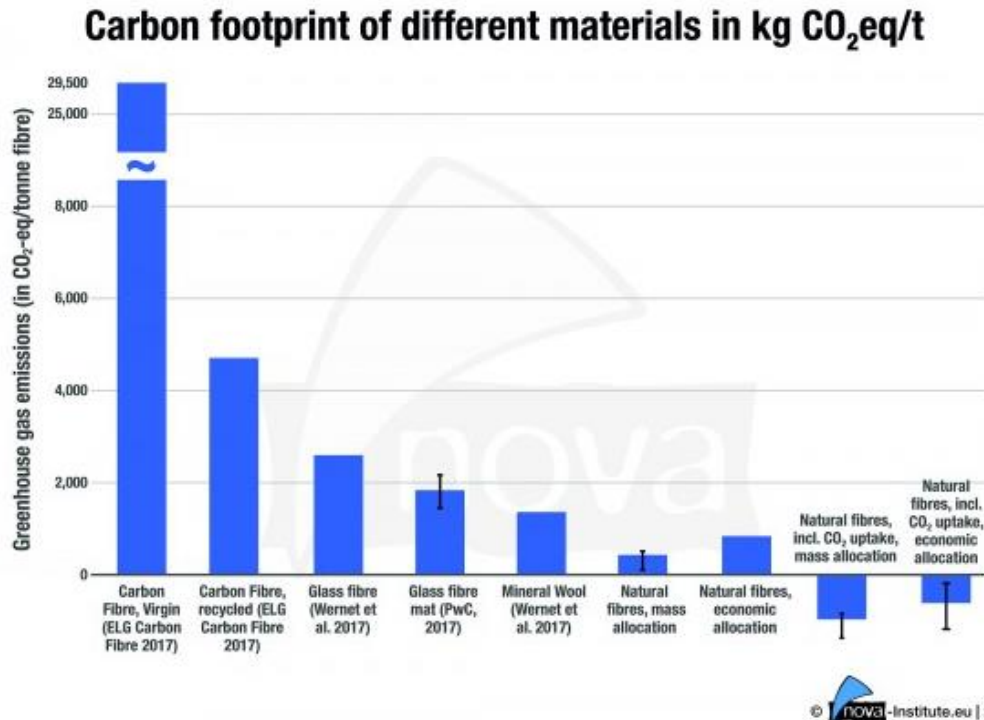
Figuur 1: Vergelijking vezeldwarsdoorsnede natuurvezel (vlasvezel), A [7], en glasvezel, B [8]

2.2 Natuurlijke oorsprong

Typische voordelen die worden aangehaald voor biocomposieten zijn de gereduceerde voetafdruk vanwege de hernieuwbare afkomst, biodegradeerbaarheid en/of composteerbaarheid. Maar wat is nu juist het verschil in milieu-impact op vezelniveau?

2.2.1 Vergelijking in CO₂-uitstoot

Uit onderzoek uitgevoerd door het Duitse Nova-Institute toont - voor een scenario tot de vezels de fabriek verlaten (cradle-to-gate) - dat natuurlijke vezels het zowel met economische – als met massa-allocatie het op vlak van CO₂-uitstoot minstens 50 % beter doen dan glasvezels. Figuur 2 toont deze vergelijking waaruit blijkt dat de uitstoot voor natuurlijke vezels maar 3 % bedraagt van de uitstoot van de productie van nieuwe koolstofvezels. Wanneer de CO₂-opname tijdens de groei in rekening wordt gebracht, komt de uitstoot van natuurlijke vezels tot een negatief resultaat, wat betekent dat natuurvezel tijdens de groei en productie in totaal meer CO₂-opneemt dan uitstoot. Het onderzoek berekent op basis van de opgeslagen koolstof in natuurlijke vezels dat de CO₂-opname tijdens de groei zo'n 1,3 tot 1,4 ton CO₂ per ton vezels bedraagt. Dit is belangrijke info voor LCA-studies rond producten met natuurlijke vezels. De opgeslagen koolstof komt namelijk terug vrij tijdens het einde leven van het product. In welke vorm deze koolstof vrijkomt kan een grote impact hebben op de totale CO₂-uitstoot van het product. Hierbij speelt het voordeel van biodegradeerbaarheid van de natuurvezels een rol als mogelijk einde leven wanneer het product niet meer hergebruikt kan worden. [9], [10]



Figuur 2: Vergelijking CO₂-uitstoot vezels voor een scenario tot de vezels de fabriek verlaten, exclusief het transport naar de klant [9], [10]

2.2.2 Reiniging akkerbodem

Naast een gereduceerde uitstoot van broeikasgassen kunnen natuurvezels tijdens de teelt ook allerlei soorten vervuiling uit de bodem halen. Recente onderzoeken tonen namelijk dat hennep zeer goed is om vervuilende stoffen, zoals PFOS en PFAS, uit de bodem op te slaan en fyto-remediatie dus mogelijk is.

De hennepplant slaat de vervuilende stoffen op in de bladeren, wortels en met zeer kleine percentages in de vezels van de stam. Hierdoor kunnen de vezels en de zaden nog gebruikt worden in andere toepassingen. Vanwege deze gunstige eigenschappen is er vanuit de akkerbouwindustrie grote interesse in natuurlijke vezels. Dit geeft een extra opportuniteit om deze natuurlijke vezels te verwerken tot o.a. biocomposieten. [11]

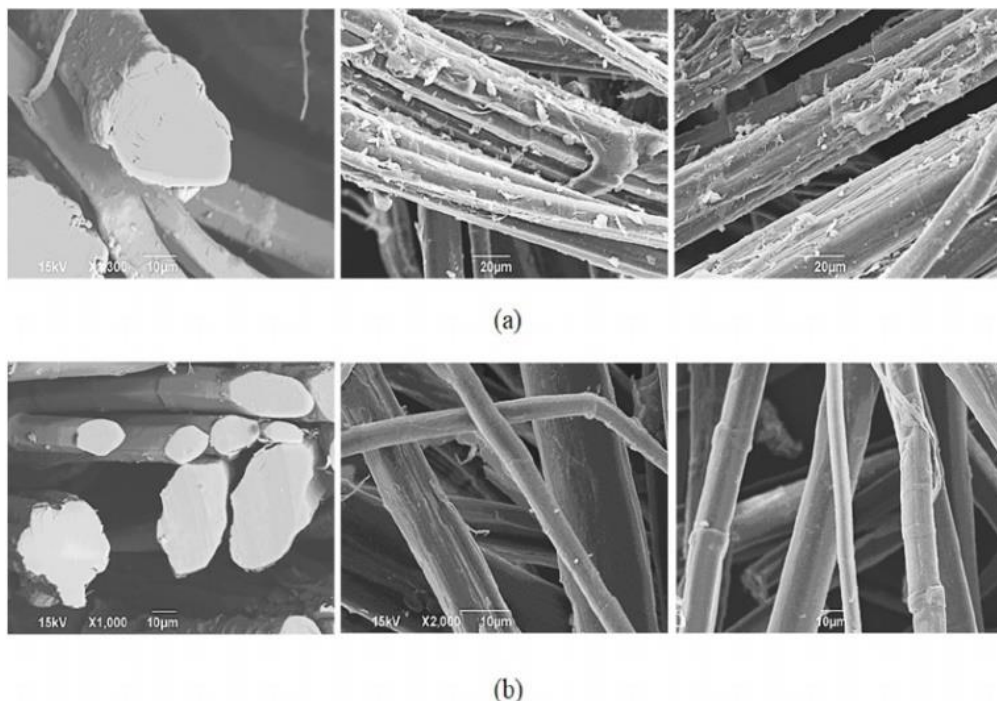
2.3 Akoestische en mechanische demping

Natuurlijke vezels hebben over het algemeen hogere dempingseigenschappen, akoestisch en mechanisch, in vergelijking met conventionele vezels zoals glasvezel en koolstofvezel. Dit betekent dat natuurlijke vezels beter in staat zijn om energie op te nemen wanneer ze worden blootgesteld aan trillingen of oscillaties. Dempingseigenschappen van een composiet product hangen echter niet alleen af van het type vezels, maar ook van het productieproces, de vezelfractie, de vezeloriëntatie en het matrixmateriaal dat wordt gebruikt. Sectie 4.4 beschrijft een vergelijking in dempingseigenschappen op composiet-/eindproduct niveau.

2.4 Vezel-matrix hechting

Een van de nadelen van het werken met natuurlijke vezels is dat het over het algemeen moeilijker is om een goede hechting te bekomen tussen vezel en matrix. Dit is verschillend ten opzichte van synthetische vezels aangezien de hechtingseigenschappen bij synthetische vezels reeds sterk geoptimaliseerd zijn. De moeilijke hechting bij biocomposieten komt onder andere doordat een hydrofobe matrix en een hydrofiële vezel worden gemengd. Ondanks eerdere onderzoeken is er voor de vezel-matrix hechting bij biocomposieten nog verbetering mogelijk. Hierdoor vindt er nog veel onderzoek plaats naar behandelingsmethoden. Deze behandelingsmethoden kunnen zowel op de vezel als op de matrix plaatsvinden. Behandelingsmethoden op het vezeloppervlak lijken de grootste effecten te hebben. [12]

De twee belangrijkste categoriën op vlak van vezelbehandeling zijn chemische behandelingen en fysische behandelingen. Een voorbeeld van het effect van een chemische alkali behandeling op vlasvezel is te zien op Figuur 3. Figuur 3 toont hoe de alkali behandeling vet, wax, lignine en hemicellulose verwijdert van het vlasvezeloppervlak. Dit zorgt voor een ruw oppervlak waarbij de cellulose in de vlasvezel wordt vrijgemaakt voor optimale binding met de matrix. Andere chemische behandelingstechnieken zorgen voor een koppelmiddel tussen vezel en matrix met een apolaire kant naar de matrix en een polaire kant naar de vezel toe. Ondanks dat het de bindingssterkte tussen vezel en matrix kan verbeteren zijn er nog uitdagingen op vlak van milieuvervuiling bij de verwijdering van de chemische stoffen na de vezelbehandeling. Fysische behandelingen doen het beter op vlak van vervuiling. Deze behandelingen kunnen de hechting verbeteren door de natuurvezel bijvoorbeeld ruwer, schoner, meer hydrofoob te maken of vrije radicalen te produceren op het oppervlak. [12]



Figuur 3: Vergelijking SEM foto's van onbehandelde vlasvezels (a) en alkali behandelde vlasvezels (b) [7]

2.5 Maximale procestemperatuur

Een aandachtspunt bij natuurvezels is dat de procestemperatuur tijdens de verwerking van composieten vaak gelimiteerd is door de vezels. Dit is het geval voor vezels opgebouwd uit cellulose zoals vlas en hennep, niet voor mineraalvezels zoals basalt.

Onderzoek toont aan dat degradatie van natuurlijke vezels naast de temperatuur ook afhankelijk is van de duur op hoge temperatuur. Hieruit blijkt dat bij het werken van natuurlijke vezels de procestemperatuur en de duur van de blootstelling aan hoge temperatuur moet geminimaliseerd worden. De procestemperatuur moet onder 200°C worden gehouden. Op temperaturen boven 200 °C vindt in de natuurvezel namelijk degradatie van de pectine, hemicellulose en cellulose plaats waardoor de mechanische eigenschappen afnemen. [13]

2.6 Prijsvergelijking

Om de inschatting tot mogelijk gebruik van natuurvezels te kunnen maken, mag het belang van de kostprijs niet vergeten worden. Het is niet mogelijk om voor de kostprijs een exacte vergelijking te maken aangezien dit vaak afhankelijk is van het product, het gevraagde volume, B2B of B2C verkoop,... . Om toch een vergelijking te maken op basis van kostprijs tussen commercieel beschikbare materialen is een vergelijking gebeurd met materiaalprijzen op de website van Easycomposites [14]. Hierbij is een prijsvergelijking gebeurd van hetzelfde type weefsel: 2x2 twill weefsels van 1000 mm breed en 200 g per m² (gsm). De vergelijking gaat hierbij uit van een aankoop van +100 lineaire meters in de periode van november 2022. Tabel 2 toont de resultaten.

Voor kevlar 49 vezels wordt enkel een weefsel van 300 gsm verkocht. Om een beeld te geven van de prijs voor hetzelfde gewicht staat in de onderste rij van Tabel 2 de lineair geschaalde prijs weergegeven voor een weefsel van 200 gsm. Deze prijs wordt aangegeven met een * omdat dit geen reële prijs is en de prijsvergelijking dit enkel gebruikt om een inschatting van de prijsverhoudingen te maken.

Tabel 2: prijsvergelijking 200g 2x2 twill woven cloth uit verschillende vezeltypes in 2022 [14]

Type vezel	Type weefsel	Prijs
glasvezel	200 g 2x2 twill woven glass cloth (1000 mm)	3 euro/m ²
vlasvezel	200g 2x2 Twill Flax Fibre Cloth (1000mm)	10,35 euro/m ²
koolstofvezel	200 g 2x2 Twill 3k Black Stuff™ Carbon Fibre Cloth (1000mm)	13,96 euro/m ²
kevlar 49 vezel	300g 2x2 Twill Weave Kevlar Cloth (1000mm)	21,1 euro/m ²
kevlar 49 vezel	200g* 2x2 Twill Weave Kevlar Cloth (1000mm)	14,1* euro/m ²

*dit is een fictieve prijs die lineair geschaald is van 300 gsm naar 200 gsm

Zoals eerder aangegeven is het niet correct om aan te nemen dat de prijzen uit Tabel 2 als altijd geldend aan te nemen. Deze vergelijking is vooral bedoeld om de prijsverhoudingen tussen de verschillende vezeltypes in beeld te brengen.

Basalt weefsel wordt niet aangeleverd door Easycomposites. Bij raadpleging van Basaltex wordt aangegeven dat de prijs van basaltvezels op vezelniveau 3 keer en op weefselniveau 2 keer de prijs van glas bedraagt.

Tabel 2 vergelijkt de wefselprijzen volgens gelijk gewicht. Het is echter relevant om naast de vergelijking in prijsverhoudingen ook de vezeldensiteit en mechanische eigenschappen te beschouwen. Tabel 3 geeft deze vergelijking weer. Deze tabel toont dat de meerprijs per kg vlasvezel ten opzichte van glasvezel al deels gecompenseerd wordt vanwege de lage densiteit. Ook de meerprijs van basaltvezel ten opzichte van glasvezel kan verantwoord worden afhankelijk van de productvereisten.

Tabel 3 : Prijsvergelijking wefsels naast de mechanische eigenschappen [3], [4], [14]

Vezel	Prijs (euro/kg)	Densiteit (g/cm ³)	Maximale rek (%)	Treksterkte (MPa)	Trekstijfheid (GPa)	Specifieke trekstijfheid (GPa / g/cm ³)
E-glas	x	2,55	2,5	2400	70	29
Basalt	2 x	2,67	3,15	2900 - 3100	85 - 89	32 - 33
Vlas	3,5 x	1,4	1,2 - 1,6	800 - 1500	60 - 80	43 - 57
Kevlar 49	5 x	1,45	2,4	3000	112	77
Carbon HS	4,5 x :	1,80	0,8 - 1,9	1400 - 4900	160 - 250	89 - 139
Carbon IM	: :	1,75	0,8 - 2,2	2350 - 7000	280 - 320	160 - 183
Carbon HM	: :	1,80	0,5 - 1,4	1900 - 5500	340 - 440	189 - 244
Carbon UHM	22,5 x	1,90	0,4 - 0,5	1800 - 3500	440 - 830	232 - 437

3 Vergelijking op matrixniveau

De vezel domineert de eigenschappen in een composieten product. Dit betekent echter niet dat de polymeren matrix onbelangrijk is voor een product. Dit hoofdstuk bespreekt de afkomst, degradeerbaarheid en milieu-impact van een biopolymeren matrix ten opzichte van fossiel gebaseerde polymeren.

3.1 Biopolymeren in het algemeen

Biopolymeren kunnen gesynthetiseerd worden uit zetmeel, suiker, natuurlijke vezels of andere organische biologisch-afbreekbare bestanddelen in verschillende samenstellingen. De belangrijkste eigenschap dat biopolymeren onderscheidt van fossiel gebaseerde polymeren is de natuurlijke oorsprong uit hernieuwbare bronnen en de mogelijkheid van biodegradatie. Biodegradatie wordt veroorzaakt door blootstelling aan bacteriën in bodem, compost of zeesediment. Vanwege de biologische en hernieuwbare oorsprong en de mogelijkheid tot biodegradatie kunnen biopolymeren een duurzaam (sustainable) alternatief zijn voor fossiel gebaseerde polymeren. [15]

De belangrijkste limitatie van biopolymeren is de hogere productiekost. Voor conventionele polymeren ligt de kost rond 1000-1500 USD/MT, de productiekost voor een veelgebruikt biopolymeer zoals polymelkzuur (PLA) ligt minstens op 4000 USD/MT en bedraagt tot 15000 USD/MT voor polyhydroxyalkanoaat (PHA). [16]

Enkele eigenschappen van biopolymeren zoals treksterkte, buigsterkte, impact sterkte, hardheid, thermische stabiliteit, ... hebben over het algemeen nog niet dezelfde waarden bereikt als bij conventionele polymeren mogelijk zijn. Een typische techniek om deze eigenschappen voor biopolymeren te verbeteren is om macro- of nano-fillers of versterkingen toe te voegen in het biopolymeer. Extra onderzoek is echter nodig om deze eigenschappen verder te verbeteren en de kost te optimaliseren. [17]

3.2 PLA

PLA is het biopolymeer waar het meest onderzoek naar gebeurt en veelbelovend is om conventionele polymeren te vervangen vanwege de hernieuwbaarheid, recycleerbaarheid, biodegradeerbaarheid en composteerbaarheid. Hiernaast is PLA goed te verwerken en is het geschikt om op verschillende manieren te verwerken. Spuitgieten, film extrusie, blow moulding, thermovormen, vezelspinnen en film-vormen behoren tot de PLA productieprocessen [18]. [19]

PLA kan afgebroken worden door middel van hydrolyse of verteerd worden door micro-organismen in de bodem.

Uitdaging bij het werken met PLA is de beperkte vuurvastheid, met een lage limiting oxygen index (LOI) tussen 19-21 %, en een beperkte weerstand tegen UV-straling aangezien UV-straling kan leiden tot destructie van de mechanische eigenschappen en bijgevolg een vermindering van de levensduur [20]. Er is reeds veel onderzoek gebeurd om deze uitdagingen te verhelpen. Zo verhogen biogebaseerde vlamvertragers de vuurvastheid van PLA [21]. Voor het verhogen van de fotochemische stabiliteit van PLA kunnen licht stabilisators gebruikt worden. [22]

Ondanks dat PLA biodegradeerbaar is, hangt het sterk af van de omgeving hoelang het duurt voor PLA om volledig te ontbinden. PLA heeft bijvoorbeeld drie maanden nodig om te ontbinden in een gecontroleerde composteeromgeving. In een niet-gecontroleerde composteeromgeving, zonder aanwezigheid van licht en zuurstof duurt het 100-1000 jaar om PLA te laten ontbinden.

Hiernaast is er geen geoptimaliseerde methode om PLA-afval van PET-afval te scheiden wanneer een product bestaat uit PLA en PET. Hierdoor zou de recyclage-efficiëntie van PET ook kunnen verlagen. Afhankelijk van de technologie om PLA-afval te verwijderen en te verwerken, wordt hierdoor het gebruik van PLA door milieuactivisten en recyclers gesteund of niet-gesteund. [16]

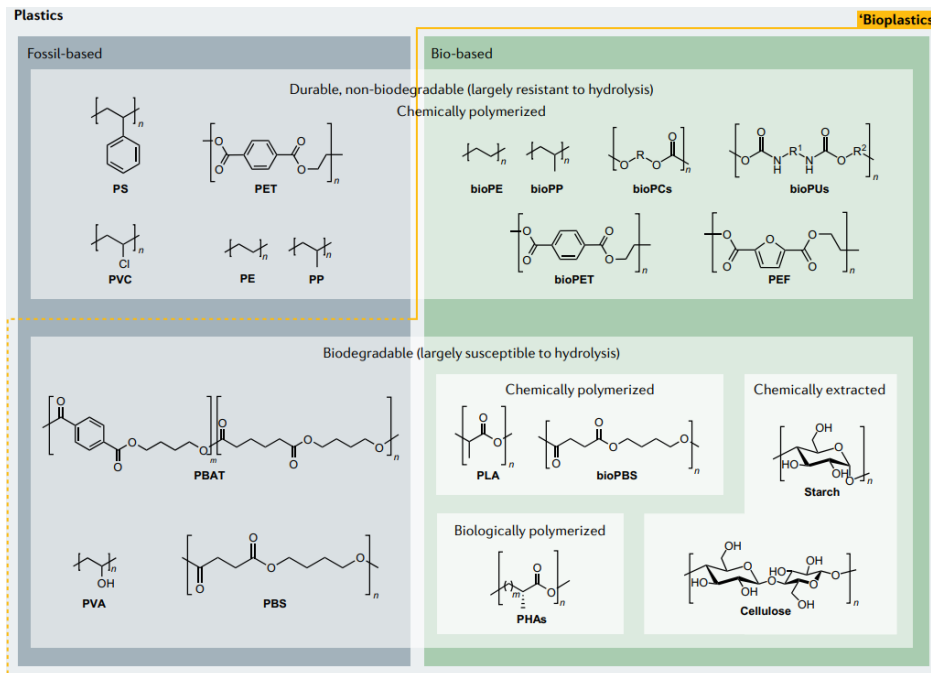
3.3 Biodegradatie

Biodegradatie wordt vaak als een positieve materiaaleigenschap gezien doordat compostering en anaerobe vergisting mogelijk zijn als einde levensverloop. Biodegradatie zorgt namelijk voor de vermindering van afval dat verbrand of gestort wordt en zo ook de milieu-impact die deze processen met zich mee brengen. Nu hebben compostering en anaerobe vergisting ook een negatieve impact en wijst onderzoek uit dat in sommige gevallen verbanding met voldoende efficiëntie in de energierecuperatie een lagere milieu-impact bekommt. In de berekeningen voor deze milieu-impact wordt echter niet rekening gehouden dat het eindproduct van compostering, compost, in de toekomst een vitale bron kan zijn voor de bodem. [23]

Voor makkelijk hydrolyseerbare polymeren, zoals PLA, is biodegradatie voordelig op voorwaarde dat deze degradatie gebeurt in een gecontroleerde industriële installatie om voor een volledige vertering zonder ongecontroleerde neveneffecten, zoals lekkage van verontreinigingen of vorming van microplastics te zorgen. [24] [25]

Recyclage van fossiel gebaseerde polymeren wordt meer en meer toegepast. Voor vezelversterkte polymeren wordt echter vastgesteld dat deze zo goed als niet gerecycleerd worden met de huidige technologieën. [26] Hierdoor kan de mogelijkheid tot biodegradatie van polymeren een meerwaarde bieden in de einde levensfase naast verbranding met energierecuperatie.

Figuur 4 toont een overzicht over hoe polymeren worden ingedeeld op basis van bio of fossiel gebaseerde afkomst en bio-afbreekbaarheid. Conventionele polymeren zijn namelijk fossiel gebaseerd en niet bio-afbreekbaar. Dit is echter anders voor biopolymeren. Biopolymeren kunnen onderverdeeld worden in verschillende categorieën. Zo bestaan biopolymeren uit natuurlijk materiaal die niet-biodegradeerbaar zijn (zoals bioPE, bioPP, bioPET) en bestaan biopolymeren uit natuurlijke materiaal die wel biodegradeerbaar zijn (zoals PLA, PHA). Hiernaast bestaan fossiel gebaseerde polymeren die ook bio-afbreekbaar zijn (zoals PBS, PBAT). [27]



Figuur 4: Overzicht polymeren in categorieën volgens fossiele of natuurlijke oorsprong en bioafbreekbaarheid, conventionele polymeren zijn fossiel gebaseerd en niet-bioafbreekbaar [27]

Er is een vergelijking te maken tussen polymeren op vlak van globaal opwarmingspotentieel van de SO_2 - en CO_2 -uitstoot, de biodegradatie duur in industriële omgeving en in de oceaan en de kost in de vier categorieën. Tabel 4 toont deze vergelijking. Industriële biodegradeerbaarheid is hierbij berekend volgens EN 13432 of ASTM D6400 condities, degradatie in oceaanwater volgens de referenties. De waarden van de SO_2 - en CO_2 -uitstoot zijn berekend voor een scenario tot het polymeer de polymeerfabriek verlaat (cradle to gate). Sommige van deze waarden hebben een breed bereik vanwege meerdere mogelijke scenario's en veronderstellingen.

Tabel 4 toont dat het voordeel voor biogebaseerde polymeren op vlak van CO_2 - en SO_2 -uitstoot in bepaalde situaties groot is, maar dat het verschil in uitstoot in andere situaties zeer beperkt blijft. Hieruit volgt dat duurzaamheidswinst in productie momenteel niet enkel bereikt kan worden door biogebaseerde polymeren te gebruiken. Efficiëntie verbeteringen in bioraffinageprocessen zijn nodig om met de gebruikte groene chemie (gebruik van niet-giftige chemicaliën en vermindering van de energiebehoefte) polymeerbouwstenen op een kostenconcurrerende en duurzame manier te leveren. Voor conventionele polymeren zijn recyclage processen reeds sterk geoptimaliseerd. Biologische recyclage bij biopolymeren is mogelijk en nodig om de uitstoot verder te minimaliseren, maar is voorlopig minder geoptimaliseerd tegenover recyclage van conventionele polymeren. [27]

De vergelijking van de kostprijs toont dat biopolymeren duurder zijn dan conventionele polymeren. Deze prijs hangt vooral samen met de productiehoeveelheid en -efficiëntie. Die wegens een stijgende kennis en vraag in de toekomst kan dalen.

Tenslotte toont Tabel 4 dat het milieu waaronder een bio-afbreekbaar materiaal degradeert een sterke invloed heeft op de afbraakduur. Bij industriële biodegradatie in een gecontroleerde omgeving duurt het voor PLA 6 tot 9 weken om af te breken. In een oceaan duurt dit voor PLA meer dan 1,5 jaar, waarbij ook bij PLA microplastics vrijkomen. Hierdoor heeft een einde levensfase in een industriële omgeving ook voor biodegradeerbare materialen de voorkeur. Als extra voordeel kan tijdens industriële biodegradatie met anaërobie vergisting naast de productie van biomassa ook extra energierecuperatie plaatsvinden.

Tabel 4 : Vergelijking milieu-impact en prijs van fossiel gebaseerde en bio-gebaseerde kunststoffen, industriële biodegradatie is berekend volgens EN 13432 of ASTM D6400, degradatie in oceaan is referentie gebaseerd [27]

Polymer	Biodegradation (industrial)	Biodegradation (ocean)	GWP cradle-to-gate (tonne CO ₂ eq per tonne polymer)	AP cradle-to-gate (kg SO ₂ eq per tonne polymer)	Price (US\$ per kg) ^{15,254}	Refs
Fossil-based and durable						
HDPE	NA	NA	1.8–2.6	6–22	1.4–1.6	111
LDPE	NA	NA	1.9–3.1	27	1.36	111
PP	NA	NA	1.5–3.6	49	1.1	151,225
PS	NA	NA	3.2	NA	0.7–1.5	180
PET	NA	NA	2.4–5	10–18	1.2–1.4	111
PVC	NA	NA	1.5–2.2	3	1.9	180
Fossil-based and degradable						
PBAT	2–3 months	>1 year	NA	NA	4.1	111,167,255
PBS	2–5 months	>1 year	NA	NA	4.5	68,167,256
PVA	1–2 weeks	4 months	NA	NA	2	147
PCL	4–6 weeks	6 weeks	NA	NA	NA	149,150,167
Bio-based and durable						
PEF	9 months	NA	2.1	NA	NA	128,130,257
bioPET	NA	NA	2–5.5	13–75	NA	151
bioPE	NA	NA	0.68	30	1.8–2.4	258
Bio-based and degradable						
bioPBS	>3 months	>1 year	2.2	75	NA	167,169,256
PLA	6–9 weeks	>1.5 years	0.5–2.9	7–21	2–3	111,167,206
PGA	2–3 months	1–2 months	NA	NA	NA	151,152
P3HB	1–4 months	1–6 months	–2.3–4	14–25	3–8	167,225,235
P4HB	4–6 weeks	1–6 months	NA	NA	3–8	151,167,259

5. Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M. & Hankamer, B. Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. *Trends Plant Sci.* 24, 237–249 (2019).
68. van den Oever, M., Molenveld, K., van der Zee, M. & Bos, H. Bio-based and biodegradable plastics – facts and figures. Focus on food packaging in the Netherlands. Report 1722. Wageningen Food & Biobased Research <https://edepot.wur.nl/408350> (2017).
111. Künkel, A. et al. in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* 1–29 (Wiley, 2016).
128. Rosenboom, J.-G., Hohl, D. K., Fleckenstein, P., Storti, G. & Morbidelli, M. Bottle-grade polyethylene furanoate from ring-opening polymerisation of cyclic oligomers. *Nat. Commun.* 9, 2701 (2018).
130. Gruter, G.-J. Technology and markets day path to the future. Avantium https://www.avantium.com/wp-content/uploads/2019/06/20190606-TechnologyDay_CTO_Gert-Jan_Gruter_breakout_final_.pdf (2019).
147. Ben Halima, N. Poly(vinyl alcohol): review of its promising applications and insights into biodegradation. *RSC Adv.* 6, 39823–39832 (2016).
149. Labet, M. & Thielemans, W. Synthesis of polycaprolactone: a review. *Chem. Soc. Rev.* 38, 3484–3504 (2009).
150. Woodruff, M. A. & Hutmacher, D. W. The return of a forgotten polymer — polycaprolactone in the 21st century. *Prog. Polym. Sci.* 35, 1217–1256 (2010).
151. Lamberti, F. M., Román-Ramírez, L. A. & Wood, J. Recycling of bioplastics: routes and benefits. *J. Polym. Environ.* 28, 2551–2571 (2020). Concise overview of properties and recycling options for popular bioplastics, such as polylactic acid, polyhydroxyalkanoates, bioPET and bioPE.
152. Jem, K. J. & Tan, B. The development and challenges of poly(lactic acid) and poly(glycolic acid). *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 3, 60–70 (2020).
167. Burgstaller, M. et al. Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe. TEXTE 57/2018 of the Umwelt Bundesamt (German Federal Environmental Office). Umwelt Bundesamt <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gutachten-zur-behandlung-biologisch-abbaubarer> (2018). Extensive review of biodegradation of most relevant bioplastics, including their biodegradation times in various environments (in German)
169. Huang, Z. et al. Biodegradability studies of poly(butylene succinate) composites filled with sugarcane rind fiber. *Polym. Test.* 66, 319–326 (2018).
180. Chanda, M. & Roy, S. K. *Plastics Technology Handbook* (Taylor & Francis, 2006).
206. Deutsche Umwelthilfe. Bioplastik in der Kompostierung. Ergebnisbericht—Umfrage [German]. Deutsche Umwelthilfe https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Verpackungen/180920_DUH_Ergebnisbericht_Kompostierungsumfrage.pdf (2018).
225. Harding, K. G., Dennis, J. S., von Blottnitz, H. & Harrison, S. T. L. Environmental analysis of plastic production processes: comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically based poly-β-hydroxybutyric acid using life cycle analysis. *J. Biotechnol.* 130, 57–66 (2007).
235. Meereboer, K. W., Misra, M. & Mohanty, A. K. Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites. *Green Chem.* 22, 5519–5558 (2020).
254. Beier, W. Biologisch abbaubare Kunststoffe. Umweltbundesamt (German Federal Office of Environment, 2009).
255. França, D. C. et al. Tailoring PBAT/PLA/Babassu films for suitability of agriculture mulch application. *J. Nat. Fibers* 16, 933–943 (2019).
256. Kunioka, M., Ninomiya, F. & Funabashi, M. Biodegradation of poly(butylene succinate) powder in a controlled compost at 58°C evaluated by naturally-occurring carbon 14 amounts in evolved CO₂ based on the ISO 14855-2 method. *Int. J. Mol. Sci.* 10, 4267–4283 (2009).
257. Eerhart, A. J. J. E., Faaij, A. P. C. & Patel, M. K. Replacing fossil based PET with biobased PEF; process analysis, energy and GHG balance. *Energy Environ. Sci.* 5, 6407–6422 (2012).
258. Koch, D. & Mihalyi, B. Assessing the change in environmental impact categories when replacing conventional plastic with bioplastic in chosen application fields. *Chem. Eng. Trans.* 70, 853–858 (2018).
259. Nakajima, H., Dijkstra, P. & Loos, K. The recent developments in biobased polymers toward general and engineering applications: Polymers that are upgraded from biodegradable polymers, analogous to petroleum-derived polymers, and newly developed. *Polymers* 9, 523 (2017).

4 Vergelijking op composiet-/eindproductniveau

4.1 Aandachtspunten tijdens verwerking tot eindproduct

De verwerking van biocomposieten tot een eindproduct heeft grote gelijkenissen met de verwerking van conventionele composieten. Buiten dat een spinproces nodig is om natuurlijke vezels te wikkelen tot garens kunnen de typische productiemethodes voor composieten ook gebruikt worden voor biocomposieten. [19]

Desondanks zijn er toch enkele aandachtspunten waarmee rekening moet gehouden worden tijdens de verwerking van biocomposieten. Zo is het belangrijk dat plantvezels zo weinig mogelijk geabsorbeerd vocht bevatten voor een optimale hechting te verkrijgen met de, vaak hydrofobe, matrix. Na de uitvoering van een droogtest wordt aangeraden om plantvezels als vuistregel minstens 4 uur op 80 °C te laten drogen alvorens deze te verwerken tot plaatmateriaal. Zo zullen de mechanische eigenschappen van het eindproduct beter en meer consistent zijn.

Verder is het belangrijk om de maximale verwerkingstemperatuur van 200°C voor de vezels niet te overschrijden. Bij het overschrijden van 200°C degraderen de pectine, hemicellulose en cellulose in de vezel waardoor de mechanische eigenschappen afnemen [13].

4.2 Duurzaamheid bij biocomposieten*

*In deze paragraaf worden inzichten toegepast van volgend artikel:

'Wat houdt duurzaamheid van een product precies in?' – Patrick Cosemans, Thomas Vandenhoute [28]

Het duurzaamheidsverhaal heeft over het algemeen twee kanten. Langs de ene kant is een product duurzaam duidend op het fysische aspect dat het een lange levensduur heeft, 'durability'. Anderzijds duidt duurzaamheid op de (ecologische) systemen of processen die ervoor zorgen dat er voor onbepaalde tijd in een bepaalde behoefte kan worden voorzien zonder dat dit nadelige gevolgen heeft voor het groter geheel, 'sustainability'.

Composieten producten hebben het potentieel voor een lange levensduur en dus duurzaam te zijn in de context van 'durability'. Op deze manier kan een composieten product bijdragen aan een duurzaamstelsel (sustainability), maar dit betekent nog niet per definitie dat een composieten product ook duurzaam (sustainable) is.

Een 100% duurzaam (sustainable) product voldoet aan volgende kenmerken:

- Ze zijn opgebouwd uit biologische (hernieuwbare) materialen die geen verstoring veroorzaken in de voedingketen of uit niet-hernieuwbare materialen die reeds in omloop zijn.
- Ze veroorzaken geen belasting van het milieu in productie, tijdens en na gebruik (energie en ecosysteem).

Vele producten scoren slecht tijdens de productiefase, sommigen kunnen dit goedmaken met een positieve score tijdens de gebruiksfase. Een typisch voorbeeld van een composieten product met een zeer goede score tijdens de gebruiksfase zijn windmolens. Ondanks de slechte score tijdens de productiefase en de uitdagingen tijdens einde leven worden windmolens door de positieve impact in de gebruiksfase als een duurzaam (sustainable) product beschouwd.

Biocomposieten hebben het potentieel om duurzaam (sustainable) te zijn vanwege het gebruik van biologische materialen met de bemerking dat deze materialen geen verstoring mogen veroorzaken in de voedingsketen. Een nadeel voor biocomposieten producten is de mogelijk kortere levensduur tegenover conventionele composieten. Dit is productafhankelijk en is belangrijk om bij de duurzaamheidsvergelijking tussen biocomposieten - en composieten producten in rekening te brengen.

Gewichtsreductie in transportapplicaties kan de gebruiksfase een positieve impact geven. Hierdoor kunnen biocomposieten vanwege lichtere natuurvezels ook tijdens de gebruiksfase van het product een voordeel bieden tegenover bijvoorbeeld conventionele glasvezelcomposieten.

Ook tijdens de productie- en eindelevensfase heeft de werking met biocomposieten voordelen tegenover conventionele composieten. In de productiefase (productie van natuurvezels en matrix en de verwerking tot product) blijkt uit een wieg tot fabriekspoort (cradle to gate) benadering dat biocomposieten een lagere uitstoot aan broeikasgassen en lagere energieconsumptie hebben. Dit wordt met concrete voorbeelden besproken in paragraaf 4.2.1 'Vermindering broeikasgassen en energieverbruik'.

Tijdens de eindelevensfase tonen biocomposieten enkele extra mogelijkheden met positieve impact tegenover conventionele composieten. Indien een composieten product als einde leven wordt verbrand met energie recuperatie kan uit natuurvezels namelijk ook energie gehaald worden, wat niet het geval is bij glasvezel. Daarnaast is voor biocomposieten ook industriële biodegradatie mogelijk met biomassa als resultaat. Recyclage met scheiding van vezels en matrix lijkt echter meer mogelijkheden te hebben voor conventionele composieten. Onderzoek is echter nog nodig om de haalbaarheid van recyclage voor zowel conventionele – als biocomposieten te verbeteren.

De duurzaamheid (sustainability én durability) van biocomposieten ten opzichte van conventionele composieten is product afhankelijk. Biocomposieten tonen echter verschillende mogelijkheden om de duurzaamheid (sustainability én durability) van producten te verhogen. Hiervoor is het belangrijk om met de volgende aandachtspunten rekening te houden, die reeds starten vanaf de designfase:

- Gebruik van hernieuwbare materialen die geen verstoring veroorzaken in de voedingsketen of niet-hernieuwbare materialen die reeds in omloop zijn
- Licht gewicht design voor transportapplicaties
- Reductie van materiaalgebruik
- Lange levensduur, mogelijkheden onderzoeken voor: herstelling, heropwaardering
- Oplossing einde leven, mogelijkheden onderzoeken voor: recyclage, hergebruik, herbestemming

Bij het verhogen van de duurzaamheid (sustainability én durability) van een product kan op elk van deze punten gewerkt worden. Er bestaat geen vastgelegde volgorde voor het werken aan deze punten, het is echter essentieel om op elk van deze punten goed te scoren om van een echt duurzaam (sustainable én durable) product te spreken.

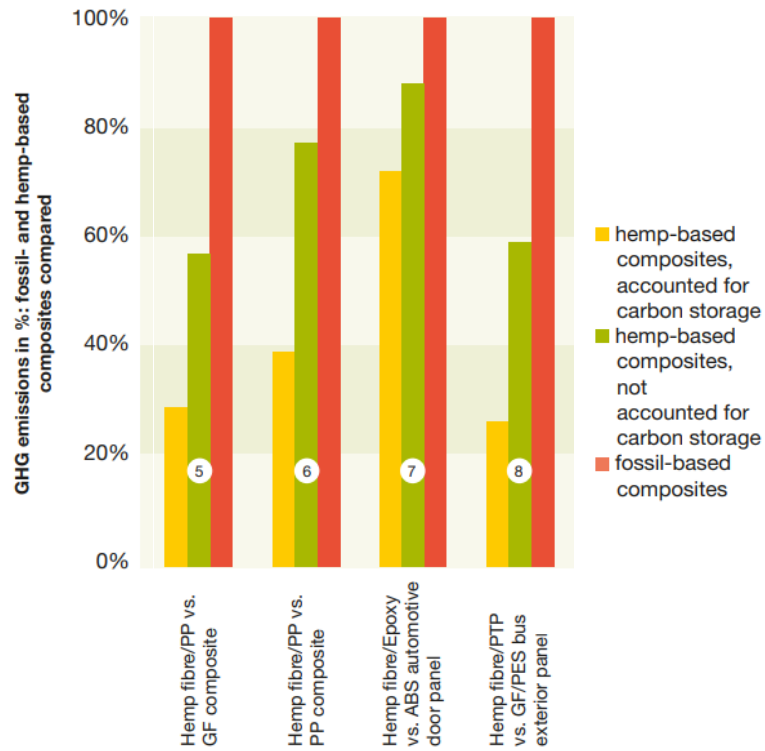
4.2.1 Vermindering broeikasgassen en energieverbruik

Om kwantitatieve uitspraken te doen over het verschil in uitstoot van broeikasgassen en energieverbruik in de productiefase kunnen enkele veronderstellingen gemaakt worden. Voor een benadering van de impact tot aan de fabriekspoort (cradle to gate, de productie van natuurvezels en matrix zelf met hierbij de verwerking tot product) is een vergelijking gebeurd van hennepvezel/PP vs. GF composieten, hennepvezel/PP vs. PP composieten, hennepvezel/epoxy vs. ABS autodeurpaneel, hennepvezel/PTP vs. GF/PES buitenpaneel van een bus.

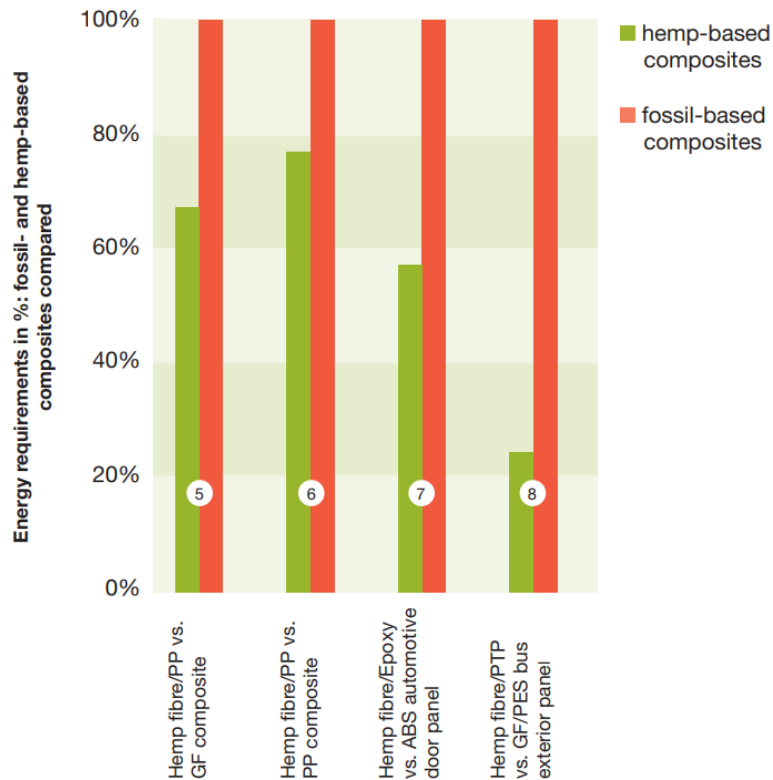
Hieruit blijkt dat hennepvezelcomposieten voor een 10 tot 50 % lagere voetafdruk zorgen dan dezelfde onderdelen in conventionele composieten. Wanneer de CO₂-opname tijdens de groei mee wordt gerekend, gaat de mogelijke uitstoot naar een vermindering van 30 tot 70 %. Dit wordt getoond op Figuur 4. Studie 5 en 6 vergelijken hierbij de productie van auto-onderdelen zoals deurbekleding en zijplaten met hierin als productieproces het maken en de extrusie van pellets uit hennep-PP verondersteld.

Figuur 5 toont dat ook het energieverbruik in de vier vergelijkingen 25 % tot 75 % daalt. Dit positief effect komt vooral door de positieve impact tijdens de vezelteelt en de productie van de biopolymeren. Voor de verwerking tot biocomposiet zijn er echter extra stappen nodig tegenover conventionele composieten. Deze extra stappen wegen echter niet op ten opzichte van het positieve effect bij de productie van de ruwe materialen.

Wanneer de gebruiksfase wordt meegerekend kan vanwege de lage dichtheid van hennepvezels ook een verbetering in milieu-impact bekomen worden in transport-applicaties zoals bijvoorbeeld een paneel in een transportapplicatie. Onderzoek voor cradle to grave waarbij de veronderstelling wordt gemaakt van een verbranding met energie-recuperatie scenario geeft aan om nog meer energiewinst en uitstootvermindering te geven vanwege de lage verhittingswaarde van hennepvezel. Hierbij komt dat hennepvezels in einde leven als laatste optie kunnen verbrand worden, bij glasvezels is dit niet mogelijk met mogelijk storten tot gevolg. [29]



Figuur 5: Vergelijking uitstoot broeikasgassen uitgedrukt in procent voor de productie van fossiel gebaseerde en hennepvezel composieten [29]



Figuur 6: Vergelijking energiebehoefte uitgedrukt in procent voor de productie van fossiel gebaseerde en hennepvezel composieten [29]

4.3 Gebruik van coatings

Biocomposieten hebben over het algemeen een lagere vuurvastheid en zijn gevoeliger voor vocht dan conventionele composieten. Hiernaast hebben enkele biopolymeren een lage UV-weerstand, krasbestendigheid en een lagere vuurvastheid. Hierdoor komen (bio)coatings meer voor bij biocomposieten dan voor conventionele composieten. Het is mogelijk om een biocomposieten product wel te laten voldoen aan deze karakteristieken door een coating aan te brengen. Deze coating kan zowel synthetisch als ook biogebaseerd zijn. Om de transitie naar biogebaseerde coatings te versnellen is net zoals het BREPLA-project onder samenwerking van Sirris en Centexbel het project 'BioCoat' uitgevoerd in de periode van 2020-2022. Dit project reikt op basis van industrieel beschikbare biobouwstenen kennis aan aan bedrijven rond de formulatie, het aanbrengen, de performantie en toepassingen van biogebaseerde coatings.

Volgende websites geven meer info over het BioCoat-project:

<https://www.sirris.be/nl/joint-project/coock-biocoat-biogebaseerde-coatings>

<https://www.centexbelpresents.be/en/biocoat>

4.4 Vergelijking dempingeigenschappen voor (bio)composieten

Mechanische eigenschappen van composieten worden grotendeels gedomineerd door de eigenschappen van de vezels. Dempingseigenschappen zijn echter wel afhankelijk van vezel én matrix.

Sectie 2.6 vermeldt dat natuurlijke vezels voor een betere mechanische en akoestische demping zorgen in vergelijking met synthetische vezels. De dempingeigenschappen van een product zijn naast de vezels ook afhankelijk van de matrix en de vezel-matrix verhouding in composieten.

Onderzoek uitgevoerd door Sirris toont aan dat het gebruik van natuurvezels ook op composiet niveau een betere demping geeft. Dit onderzoek vergelijkt testsamples met een gelijkaardige resonantie frequentie en meet hierbij met een impuls excitatie techniek de demping van een excitatie. De testsamples bestaan uit een weefsel gecombineerd met een epoxy hars en zijn geproduceerd via vacuïminfusie. Tabel 5 toont de resultaten van deze vergelijking. Hieruit blijkt dat de demping van het vlasvezelcomposiet twee keer zo hoog is dan het glasvezelcomposiet en 10 keer hoger dan het koolstofvezelcomposiet in deze test.

Tabel 5 : Vergelijking dempingskarakteristieken voor testsamples met gelijkaardige resonantiefrequentie, opgebouwd uit weefsels met verschillende vezeltypes en geïnfuseerd met epoxy hars via vacuïminfusie

Vezeltype	Demping (%)	Frequentie (Hz)	V _f (%)
Vlas	2,01	1422	34,9
Glas	0,97	1605	50,6
Koolstof	0,23	1555	54,7

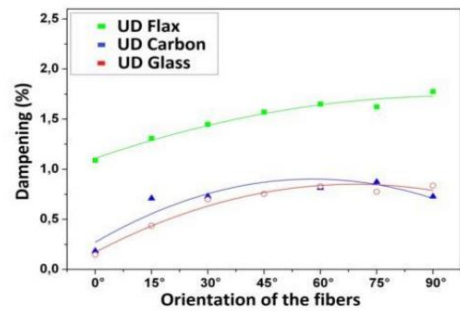
Ook onderzoek uitgevoerd door vlasvezelproducent Eco-Technilin toont dat vlasvezels betere dempingskarakteristieken vertonen dan glas- en koolstofvezels. Deze resultaten zijn weergegeven in Figuur 7.

Figuur 7 toont deze resultaten. De resultaten van deze bron weergegeven in de tabel en in de grafiek verschillen echter. De tabel toont dat de demping voor UD vlasvezel 8 tot 10 keer hoger is dan voor glas- of koolstofvezel. De grafiek geeft echter aan dat de demping in de vezelrichting van UD-vlasvezel (+1,2%) zo'n 4 keer hoger is dan UD-glas- en -koolstofvezel (+0,3%) en de demping 90° tegenover de vezelrichting van UD vlasvezel (+1,75%) zo'n 2,3 keer hoger is dan UD glas- en koolstofvezel (+0,75%). Hieruit blijkt dat het verschil tegenover conventionele vezels in verhouding het grootste is in de vezelrichting, maar dat de absolute demping bij zowel natuurlijke als conventionele vezels toeneemt bij een grotere hoek tegenover de vezelrichting. [30]

Damping properties:

Low frequency dampening (flexion/mode 2):

Product	Dampening ratio
UD Flax	1.47%
UD Carbon	0.18%
UD Glass	0.15%



Figuur 7: Vergelijking dempingskarakteristieken op lage frequentie voor UD-composiet in functie van de vezeloriëntatie [30]

5 Conclusie

Dit verslag vergelijkt biocomposieten ten opzichte van conventionele composieten op vezel-, matrix- en composiet-/eindproductniveau.

De vergelijking op vezelniveau in Hoofdstuk 2 toont dat op basis van mechanische eigenschappen hennep- en vlasvezels de natuurvezels zijn met de hoogste waarden en in specifieke eigenschappen hebben die vergelijkbaar zijn met glasvezel. Aandachtspunten bij natuurvezels zijn de aanwezige garentwist, de aanwezige variatie in dwarsdoorsnede, moeilijkere vezel-matrix hechting en een maximale procestemperatuur van 200 °C. Hiernaast hebben natuurvezels betere mechanische en akoestische dempings-eigenschappen en zorgt de natuurlijke oorsprong voor een lagere CO₂-uitstoot en de mogelijkheid tot reiniging van een akkerbodem. Een vergelijking in vezelprijsverhoudingen geeft aan dat de prijs van basaltvezel +-2 keer en vlasvezel +-3,5 keer de prijs van glasvezel bedraagt per kg. De lagere densiteit van vlasvezels compenseert dit prijsverschil deels.

De vergelijking op matrixniveau in Hoofdstuk 3 toont dat biopolymeren over het algemeen lagere eigenschappen hebben ten opzichte van conventionele polymeren. Het is mogelijk om deze eigenschappen te verbeteren, al heeft dit een koststijging tot gevolg.

PLA is een biopolymeer die goed verwerkbaar is. De beperkte vuurvastheid en UV-resistentie van PLA kunnen verholpen worden met vlamvertragers en stabilisatoren.

Hiernaast toont Hoofdstuk 3 dat biodegradatie enkel een volwaardig alternatief biedt in de einde levensfase in een industriële setting en toont Tabel 4 dat de vergelijking in uitstoot van CO₂ en SO₂ voor een cradle to gate scenario sterk afhangt van de veronderstelde processen.

De vergelijking op composiet-/eindproductniveau in Hoofdstuk 4 bespreekt de aandachtspunten tijdens de verwerking tot een eindproduct zoals de aangeraden voordroogduur van minstens 4 uur bij 80°C. Hiernaast toont dit hoofdstuk vijf aandachtspunten om de duurzaamheid (sustainability én durability) van composieten te verbeteren. Deze aandachtspunten starten reeds vanaf de designfase en zijn elk essentieel om tot een echt duurzaam product te komen. Verder toont een studie aan de hand van concrete cases in een cradle to gate scenario dat hennepvezelcomposieten voor een 10 tot 50 % lagere voetafdruk zorgen en wanneer de CO₂-opname tijdens de groei mee wordt gerekend zelfs van 30 tot 70 %. De vergelijking in energieverbruik voor deze cases toont een vermindering van 25% tot 75% van cradle to gate. Hiernaast legt dit hoofdstuk uit waarom bij biocomposieten coatings meer worden toegepast dan bij conventionele composieten. Ten slotte komen twee onderzoeken rond de mechanische demping van biocomposieten uit dat natuurvezelcomposieten een betere demping vertonen dan conventionele composieten. Zo vertonen vlasweefsel-epoxy composieten een dubbel zo hoge demping dan glasweefsel-epoxy composieten en is de demping 10 keer hoger dan voor koolstofweefsel-epoxy composieten wanneer de resonantie frequentie gelijk wordt gehouden rond 1500 Hz.

6 Referenties

- [1] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, 5th Edition, FREE PR, 2003.
- [2] M. Midani, "Natural fiber composites: What's holding them back?," *Composites World*, 2019.
- [3] F. Goethals, "Leverbaarheid 2.1: Rapport over 100% natuurlijke vezels en vezelmodificatie voor thermohardende composiettoepassingen," Centexbel, Gent, 2021.
- [4] "KEVLAR® Aramid fiber technical guide," DuPont, Richmond, 2017.
- [5] A. Moudood, W. Hall, A. Öchsner, H. Li, A. Rahman and G. Francucci, "Effect of Moisture in Flax Fibres on the Quality of their Composites," *JOURNAL OF NATURAL FIBERS*, vol. 16, p. 209–224, 2019.
- [6] R. Figueiro and S. Rana, "Effect of Yarn Twist on Composite Properties," in *Advances in Natural Fibre Composites Raw Materials, Processing and Analysis*, Minho, Springer, 2018, pp. 103-104.
- [7] A. Amiri, C. A. Ulven and S. Huo, "Effect of Chemical Treatment of Flax Fiber and Resin Manipulation on Service Life of Their Composites Using Time-Temperature Superposition," *Polymers*, North Dakota, 2015.
- [8] W. Li, C. Ji, H. Zhu, F. Xing, J. Wu and X. Niu, "Experimental Investigation on the Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites Containing Nanocomposite," *Journal of Nanomaterials*, Shenzhen, 2013.
- [9] Renewable Carbon News, "Natural fibres show outstandingly low CO₂ footprint compared to glass and mineral fibres," 2 April 2019.
- [10] N. d. Beus, M. Carus and M. Barth, "Carbon Footprint and Sustainability of Different Natural Fibres for Biocomposites and Insulation Material," Nova Institute for Ecology and innovation, Hürth, 2019.
- [11] F. V. d. Linden, "Hennep biedt kansen voor sanering van PFOS-vervuiling," *Landbouwleven*, Zwijndrecht, 2022.
- [12] R. Figueiro and S. Rana, "Interface Modification and Its Effect on Composite Properties," in *Advances in Natural Fibre Composites Raw Materials, Processing and Analysis*, Minho, Springer, 2018, pp. 101-103.
- [13] J. L. Thomason and J. L. Rudeiros-Fernández, "Thermal degradation behaviour of natural fibres at thermoplastic composite processing temperatures," *Polymer Degradation and Stability*, no. 188, 2021.

- [14] "easycomposites.eu," Easy Composites, [Online]. Available: <https://www.easycomposites.eu/>. [Accessed Novembre 2022].
- [15] S. Mohan, O. S. Oluwafemi, N. Kalarikkal, S. Thomas and S. P. Songca, "Biopolymers – Application in Nanoscience and Nanotechnology," IntechOpen, 2016.
- [16] S. Swati, A. K. Nadda and R. Bhat, *Biopolymers - Recent Updates, Challenges and Opportunities*, Cham: Springer, 2022.
- [17] S. K. Kumar, S. Prosenjit, A. Jaideep, D. Kalim, A. M. Basheer and C. John-John, "Recent advances in mechanical properties of biopolymer composites: a review," *Polymer composites*, vol. 41, pp. 32-59, 2020.
- [18] R. Rasal, A. Janorkar and D. Hirt, "Poly(lactic acid) modifications," *Progress in Polymer Science*, no. 35, pp. 338-356, 2010.
- [19] R. Ilyas, S. Sapuan, M. Harussani, M. Hakimi, M. Haziq, M. Atikah, M. Asyraf, M. Ishak, M. Razman, N. Nurazzi, M. Norrahim, H. Abral and M. Asrofi, "Polylactic Acid (PLA) Biocomposite: Processing, Additive Manufacturing and Advanced Applications," *Polymers*, vol. 1326, no. 13, p. 34, 2021.
- [20] S. Agustin-Salazar, N. Gamez-Meza, L. À. Medina-Juàrez, H. Soto-Valdez and P. Cerruti, "From Nutraceuticals to Materials: Effect of Resveratrol on the Stability of Polylactide," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, pp. 1534-1542, 2014.
- [21] G. Ye, S. Huo, C. Wang, Q. Shi, Z. Liu and H. Wang, "One-step and green synthesis of a bio-based high-efficiency flame retardant for poly (lactic acid)," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 192, no. 109696, 2021.
- [22] Q. Shuang, S. Jun, L. Yuchun, Z. Tao, L. Hongfei, G. Xiaoyu, F. Bin and Z. Sheng, "Life cycle design of fully bio-based poly(lactic acid) composites with high flame retardancy, UV resistance, and degradation capacity," *Journal of cleaner production*, vol. 360, pp. 132-165, 2022.
- [23] M. R. Yates and C. Y. Barlow, "Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—A critical review," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 78, pp. 54-66, 2013.
- [24] R. Mülhaupt, "Green polymer chemistry and bio-based plastics: dreams and reality," *Macromol. Chem. Phys.*, vol. 214, pp. 159-174, 2013.
- [25] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), "Improving Plastics Management: Trends, Policy Responses, and the Role of International Co-operation and Trade," *OECD Environmental Policy Paper*, no. 12, 2018.
- [26] R. Geyer, J. R. Jambeck and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made.," *Sci. Adv.*, vol. 3, pp. 25-29, 2017.
- [27] J.-G. Rosenboom, R. Langer and G. Traverso, "Bioplastics for a circular economy," *Nature reviews | materials*, vol. 7, pp. 117-137, 2022.

- [28] T. V. Patrick Cosemans, "Sirris," 9 Augustus 2022. [Online]. Available: <https://www.sirris.be/nl/inspiratie/wat-houdt-duurzaamheid-van-een-product-precies>. [Accessed November 2022].
- [29] J. Haufe and M. Carus, "Hemp Fibres for Green Products - An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications," European Industrial Hemp Association, Hürth, 2011.