



Biobased fibre **RE**inforced **PLA**stics

Leverbaarheid 5.3.1

Proof of concept: assemblage

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

Inhoudstafel

Introductie.....	4
1 Ontwerp van verbindingen.....	5
1.1 Mechanische verbindingen.....	5
1.2 Lijmverbindingen	6
1.3 Lassen van thermoplastische composieten	8
2 Proof of concept: lassen van thermoplastische biocomposieten	10
2.1 Spiegellassen	10
2.2 Inductielassen	14
Conclusie	18
Referenties.....	19

Lijst met figuren en tabellen

Figuren

Figuur 1: Richtlijnen bij het ontwerp van mechanische verbindingen waarbij S = afstand zijkant van het gat tot de plaatrand, D = diameter van het gat, d = diameter van de pin, w = breedte van de plaat	6
Figuur 2: Voorbeelden van goed en slecht ontwerp van een lijmverbinding [1].....	7
Figuur 3: Verschillende ontwerpen van lijmverbindingen met het afschuifspanningsverloop en de relatieve sterkte hiervan [2]	7
Figuur 4: Voorbeeld van een spiegellasttest met een vlas-PP sandwichpaneel	10
Figuur 5: Spiegelasverbinding in de opstapdemonstrator uit een basalt-PLA sandwichpaneel.....	11
Figuur 6: Het dichtlassen van sandwichpanelen als randafwerking voor de kruk en opstapdemonstrator, eerste set-up op kleine schaal	11
Figuur 7: Het dichtlassen van sandwichpanelen als randafwerking voor de kruk en opstapdemonstrator, set-up op grotere schaal.....	12
Figuur 8: Voorbeeld van een lasverbinding tussen non-woven biocomposieten hennep-PP (bovenaan) en vlas-PLA (onderaan).....	12
Figuur 9: De dakkoffer demonstrator uit het BREPLA-project	13
Figuur 10: De gelaste overlapverbinding in de dakkoffer demonstrator uit het BREPLA-project	13
Figuur 11: Het concept van inductielassen generiek geïllustreerd	14
Figuur 12: Inductiegenerator (Cobes) en spoel die gebruikt zijn om onderstaande testen uit te voeren	14
Figuur 13: Stalen gaas na opwarming met de pannenkoekspoel	15
Figuur 14: Voorbeeld van een vlas-sample voor de enkelvoudige overlapverbinding met de inductielas techniek.....	15
Figuur 15: Opstelling tijdens inductielastesten met vlakke spoel	15
Figuur 16: Overlapoppervlaktes van de vlas-PLA samples na afschuivingstest op de trekbank	16
Figuur 17: 3D-stuk en vlakke plaat voor een proof of concept inductielas test.....	17
Figuur 18: Mechanische sterkte test van de inductielasverbinding in de trekbank	17

Tabellen

Tabel 1: Resultaten van de afschuivingstest op de trekbank	16
--	----

Introductie

Een van de voordelen van composietproducten is de mogelijkheid om grote geïntegreerde producten te maken, waarin verbindingen zoveel mogelijk worden vermeden. Toch zal het steeds noodzakelijk blijven om onderdelen op een goede manier te kunnen verbinden, bijvoorbeeld voor een besparing in malkost te realiseren of om (sub)componenten makkelijker te kunnen vervangen of herstellen. Dit verslag geeft in Hoofdstuk 1 een overzicht en ontwerprichtlijnen voor de verschillende types verbindingen bij composieten. Hiernaast overloopt Hoofdstuk 2 concrete testen rond spiegellassen en inductielassen die dienen als proof of concept om het potentieel van lasverbindingen bij thermoplastische biocomposieten te tonen.

1 Ontwerp van verbindingen

Ondanks dat in composieten producten typisch minder verbindingen nodig zijn dan in metalen producten, zullen deze steeds cruciaal blijven om tot een volwaardig product te kunnen komen. Composietdelen moeten namelijk vaak aan constructiedelen verbonden worden, die gemaakt zijn van een ander materiaal. Daarnaast kan het voorkomen dat composietdelen aan elkaar verbonden moeten worden vanwege bijvoorbeeld een besparing in malkost of om (sub)componenten makkelijker te kunnen vervangen of herstellen.

Verbindingen voegen echter ook gewicht toe aan de typisch lichtgewicht composieten. Hierdoor is het belangrijk om efficiënte verbindingen te ontwerpen en het aantal verbindingen te minimaliseren.

Er bestaan vier type verbindingen: mechanische verbindingen, lijmverbindingen, lasverbindingen en hybride verbindingen. Dit hoofdstuk overloopt de eerste drie hiervan. Plantvezels hebben een lagere thermische geleidbaarheid dan synthetische vezels, dit is een belangrijk aandachtspunt wanneer met plantvezel versterkte kunststoffen worden gelast. Verder zijn biovezels typisch minder abrasief dan synthetische vezels, wat maakt dat ze vlotter te versnijden zijn, wat voor meerdere verbindingstypes voordelig is. Hiernaast doen er bij biocomposieten zich geen extra aandachtspunten voor als het gaat over verbindingen tegenover synthetische composieten. Dit hoofdstuk beschrijft de verbindingstechnieken voor composieten in het algemeen.

1.1 Mechanische verbindingen

Mechanische verbindingen in composieten zijn typisch pen-gat verbindingen. Mechanische verbindingen zijn belangrijke verbindingen voor composieten, maar hebben echter ook belangrijke nadelen.

Bij continue vezel composieten zorgen deze verbindingen steeds voor een onderbreking van de vezels wat leidt tot spanningsconcentraties. Vanwege het brosse gedrag van composieten en de anisotrope eigenschappen, kunnen deze spanningsconcentraties hoger oplopen dan bij metalen. Wanneer de schroefdraad tegen een gatrand rust treedt er ook een extra vlaktedruk op. Een ander nadeel van mechanische verbindingen is dat deze over het algemeen zwaarder zijn tegenover andere verbindingen. Bij koolstofvezelcomposieten moet steeds in het oog gehouden worden of dat er geen galvanische corrosie optreedt. Een voordeel van biocomposieten is dat ze niet elektrisch geleidend zijn, waardoor ze ook geen aanleiding kunnen geven tot galvanische corrosie.

Mechanische verbindingen bieden enkele voordelen. Zo zijn deze verbindingen reversibel, wat het makkelijk maakt om aparte onderdelen te vervangen. Ook kan de kwaliteit van deze verbindingen, op basis van de voorspanning, makkelijk en niet-destructief gecontroleerd worden.

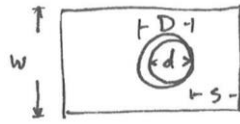
Om spanningsconcentraties zo veel mogelijk te beperken, is het belangrijk om bij het design van mechanische verbindingen rekening te houden met enkele richtlijnen aangegeven op Figuur 1. Om verder scheurvorming rond een mechanische verbinding zo veel mogelijk te beperken en de voortgang hiervan te verhinderen is het aangeraden om rond een mechanische verbinding steeds een quasi isotrope $[+45/-45/0/90]_s$ lay-up te gebruiken.

Recommendations:

$$s/D > 3$$

$$w/D > 5$$

$$D = d$$



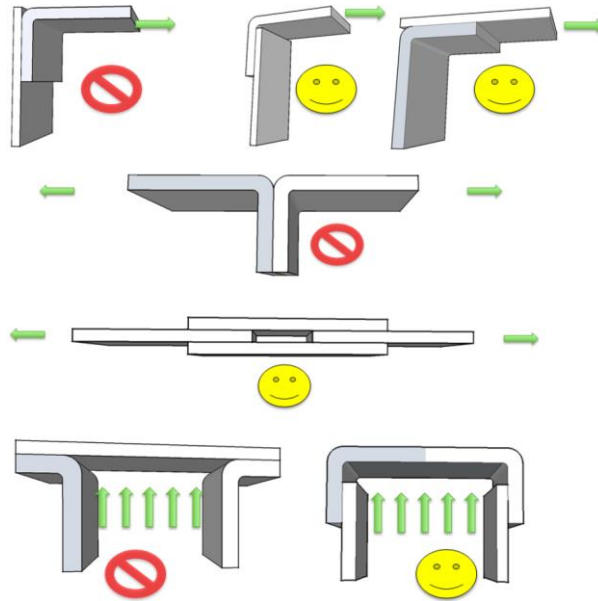
Figuur 1: Richtlijnen bij het ontwerp van mechanische verbindingen waarbij S = afstand zijkant van het gat tot de plaatrand, D = diameter van het gat, d = diameter van de pin, w = breedte van de plaat

Voor verschillende mechanische verbindingen kan het zin hebben een stuk metaal, hout of composiet in de te verbinden onderdelen te bevestigen, dit wordt ook wel een insert genoemd. Deze inserts zorgen ervoor dat de spanningen die door de bout/schroef worden doorgegeven beter verdeeld worden en een betere verbinding met het materiaal bekomen wordt. Inserts zijn zeer typisch voor sandwich composieten, het is meestal ingebouwd in het laminaat of sandwich tijdens de productie, maar kan ook later verlijmd worden. Het toevoegen van inserts is niet mogelijk in alle processen, bijv. bij thermovormen zijn inserts moeilijker toe te voegen dan bij infusieprocessen.

De toevoeging van inserts zorgt voor twee extra uitdagingen tijdens productie zo is het moeilijk om deze inserts nauwkeurig te positioneren. Hiernaast kunnen inserts de vloeit van de matrix beïnvloeden wat kan leiden tot meer laslijnen en droge plekken in het product. [1]

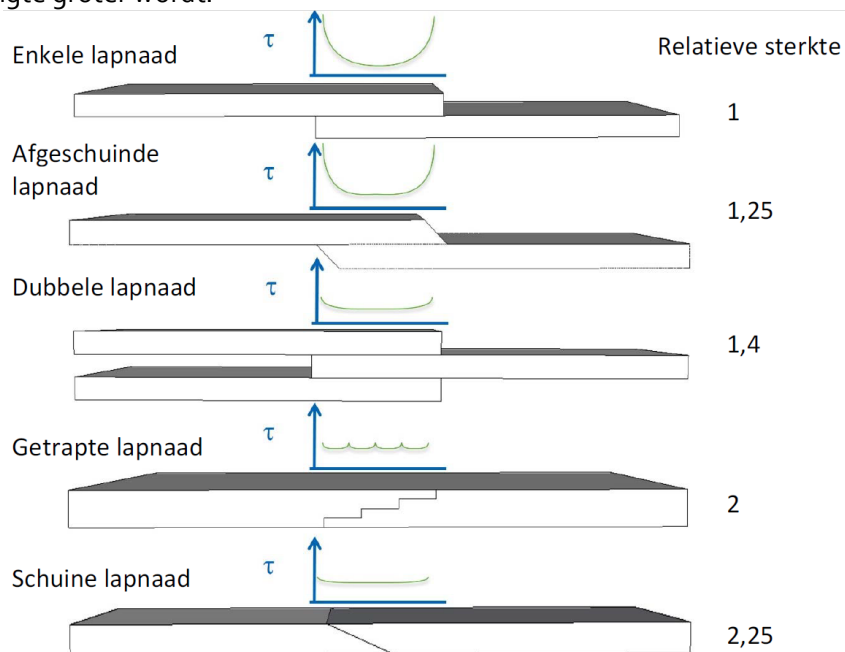
1.2 Lijmverbindingen

Als een keuze mogelijk is worden lijmverbindingen vanwege lagere spanningsconcentraties vaak verkozen boven mechanische verbindingen. Het design en de voorbereiding van de lijmverbinding zijn echter cruciaal. Zo kan de lijmverbinding het meeste kracht opnemen volgens afschuifbelasting. De lijmsterkte voor een belasting loodrecht op het lijmoppervlak is veel lager. Pelspanningen loodrecht op de lijmverbinding moeten dus zoveel mogelijk vermeden worden in het design. Figuur 2 toont goed en slecht ontwerp van een lijmverbinding. [1]



Figuur 2: Voorbeelden van goed en slecht ontwerp van een lijmverbinding [1]

Ook excentriciteit en asymmetrie van een lijmverbinding wordt best vermeden. De asymmetrie zorgt namelijk voor secundaire buiging in de verbindingen wat leidt tot pelspanningen. Hiernaast zorgt de plaatselijke overlap voor een plaatselijke stijfheidsverandering. Deze stijfheidsverandering zorgt voor spanningsconcentraties aan de randen van de overlap. Figuur 3 toont het verloop van de afschuifspanning typisch verschild tussen verschillende verbindingsopties. Hiernaast geeft deze figuur een vergelijking weer in relatieve sterkte tussen de verbindingen. Hieruit blijkt dat een dubbele overlap of een afgeschuinde overlap het sterkste resultaat geeft. De productie van dit type verbinding is echter complexer dan een enkelvoudige overlapverbinding. Een manier om de spanningspieken te verlagen is een vergroting van de lijmmoppervlakte, de invloed van de lijmmoppervlakte op de spanningspieken neemt echter af naarmate de overlaplengte groter wordt.



Figuur 3: Verschillende ontwerpen van lijmverbindingen met het afschuifspanningsverloop en de relatieve sterkte hiervan [2]

Belangrijk bij het lijmen van composieten is uiteraard de keuze voor de soort lijm die gebruikt wordt. Om spanningspieken in de lijm zelf te vermijden heeft deze lijm best een vergelijkbare afschuifstijfheid als de matrix in het composiet. Hiernaast moet de lijm te verwerken zijn, zijn de lijmkosten belangrijk en moet de lijm passen bij de te lijmen oppervlaktes. Dit op vlak van hechting, maar ook moet vermeden worden dat de polymeermatrix oplost in de lijm. Er bestaan drie lijmtypes:

- Thermoplastische ('hot melt') lijmen
- Twee-componentlijmen
- Lijmoplossingen

Een nadeel aan lijmverbindingen is dat de kwaliteit wordt bepaald door goed vakmanschap. Zo is typisch een voorbehandeling vereist voor de te lijmen oppervlaktes (reiniging, eventueel schuren, eventueel plasmabehandeling). Hiernaast moet de lijm onder de juiste condities worden aangebracht wat moeilijk te controleren is. Zo kan de kwaliteit van de verbinding afhankelijk zijn van de omgeving (temperatuur, vocht), aanbrengingsmethode en de lijmdikte, wat niet makkelijk te controleren is. Een andere nadeel voor lijmverbindingen is dat het moeilijk is om de exacte kwaliteit van de verbinding te bepalen na het aanbrengen, maar ook tijdens onderhoud. De kwaliteit van de verbinding kan namelijk vooral bepaald worden door destructieve testen. [1]

1.3 Lassen van thermoplastische composieten

Wanneer gewerkt wordt met thermoplastische composieten is het mogelijk om deze aan elkaar te lassen. Met lassen wordt hiermee het lokaal opsmelten en stollen onder druk van de polymeermatrix en/of een toegevoegde thermoplastische film bedoeld.

Het lasproces van thermoplastische composieten kan beschreven worden in 4 stappen:

- Voorbereiding van het oppervlak: verwijderen van contaminatie, mechanische of chemische behandeling
- Lokale opwarming: tot boven smeltemperatuur van de polymeermatrix
- Aanbrenging van druk: verzekeren van volledig contact en mogelijk maken van intermoleculaire diffusie
- Koeling: afkoelsnelheid beïnvloed de kristallisatiegraad

De lasverbinding kan beschouwd worden als een lijmverbinding waarbij het thermoplastische polymeer de lijm is. De ontwerprichtlijnen en de invloeden in het spanningsverloop zijn hierdoor gelijkaardig aan deze voor lijmverbinding. De lasverbinding is namelijk het meest performant wanneer het volgens een afschuifbelasting wordt belast, zie Figuur 2. De spanningspieken zullen ook lager zijn bij een symmetrische verbinding en bij een geleidelijke dikte overgang, zie Figuur 3.

Er bestaan verschillende lasmethodes. Onderscheid kan gemaakt worden op vlak van opwarmmethode. Mogelijke opwarmmethodes zijn:

- Conductieverwarming via een warme tool, bijv. spiegellassen
- Wrijvingsverwarming door beide materialen tegenover elkaar heen en weer te laten bewegen, bijv. ultrasoon lassen.
- Elektromechanische verwarming: het tussenvlak wordt opgewarmd door bijvoorbeeld inductieverwarming, bij niet koolstofvezel-composieten worden hierbij een metaal- of koolstofvezellaag aan toegevoegd. Hiernaast is bij de

toevoeging van een metalen laag het ook mogelijk om de laag op te warmen door het aanleggen van een elektrische stroom door de metalen laag, weerstandlassen genoemd.

Voordelen van thermoplastische lasmethodes zijn de automatiseerbaarheid, de lassnelheid en de mogelijkheid om een verbinding te maken zonder toevoeging van extra materiaal. Nadelen zijn dat deze technieken minder flexibel en moeilijker op te schalen zijn dan mechanische en lijmverbindingen. De demonteerbaarheid van de verbindingen is afhankelijk van de lastechniek.

2 Proof of concept: lassen van thermoplastische biocomposieten

Dit hoofdstuk overloopt enkele concrete testen rond spiegellassen en inductielassen die dienen als proof of concept om het potentieel van lasverbindingen bij thermoplastische biocomposieten te tonen.

2.1 Spiegellassen

Voor de uitwerking van de opstap- en de dakkoffer demonstrator binnen het BREPLA project zijn spiegellas verbindingen gebruikt.

Voor de opstapdemonstrator zijn hierbij de twee huidlagen van twee sandwichpanelen aan elkaar gelast. Dit gebeurde zowel met vlas-PLA sandwichpanelen als met basalt-PLA sandwichpanelen. De basis van het lassen met thermoplastische composieten is om de te verbinden oppervlaktezones al dan niet lokaal op te smelten, naar elkaar toe te brengen en deze onder druk te laten afkoelen.

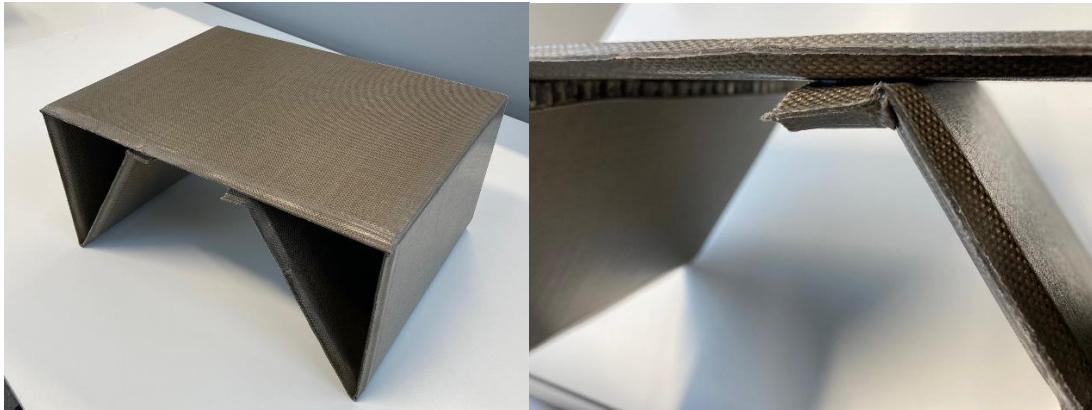
Binnen het BREPLA-project is deze lasmethode manueel toegepast met behulp van een spiegellas. Figuur 4 toont een van de uitgevoerde proof of concept testen met een vlas-PP sandwichpaneel. Om tot een goede las te komen werd de spiegellas opgewarmd tot 200 °C om de skins vervolgens lokaal op te warmen en na zo'n 10-30 seconden manueel tegen elkaar te duwen om af te koelen.



Figuur 4: Voorbeeld van een spiegellastest met een vlas-PP sandwichpaneel

Het opwarmen van de lokale zone gebeurt in enkele seconden. De exacte opwarmduur hangt af van het gebruikte materiaal en de materiaaldikte. Voor basalt-PLA huidlagen van 0,7 mm duurt dit bijvoorbeeld zo'n 8 seconden, voor vlas-PLA huidlagen van 1,0 mm duurt dit zo'n 20 seconden. Dit komt door zowel het verschil in materiaaldikte als de betere warmtegeleiding van basalt tegenover vlas.

De spiegellasverbinding van sandwichpanelen wordt toegepast in de opstapdemonstrator waarbij dit voor een verbinding zorgt van het uiteinde van het paneel met de bovenkant van de opstap, Zie Figuur 5. Deze verbinding zorgt ervoor dat de verticale wanden onder druk niet open kunnen plooiën.

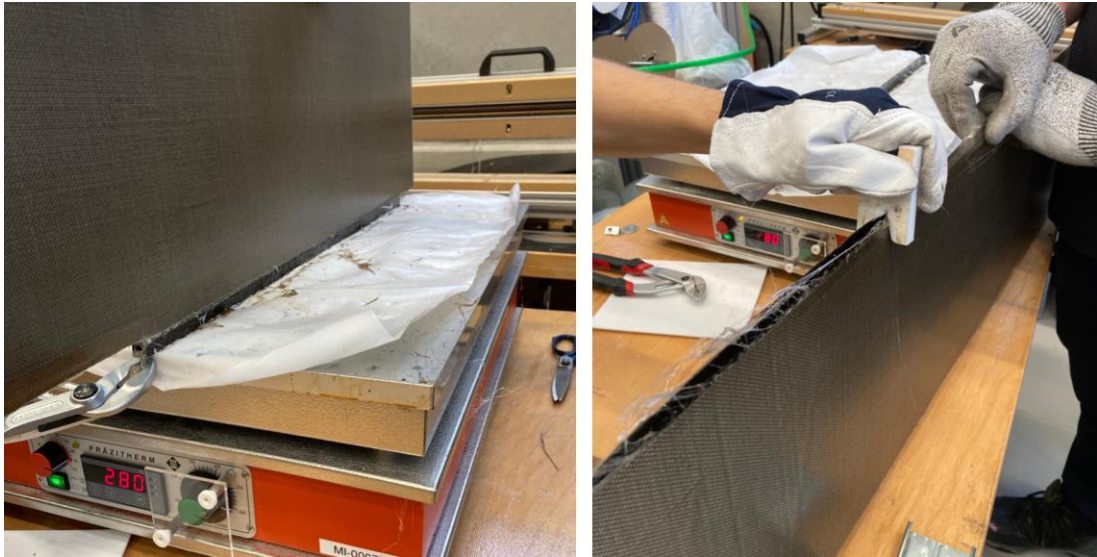


Figuur 5: Spiegelasverbinding in de opstapdemonstrator uit een basalt-PLA sandwichpaneel

Naast de lasverbinding onderaan de bovenkant zijn, als randafwerking, ook de randen van de opstap en kruk demonstrator dichtgelast. Hoe deze randafwerking er precies uit ziet, was reeds te zien op Figuur 5. Figuur 6 (op kleine schaal) en 7 (op grotere schaal) toont hoe deze randafwerking is uitgevoerd. Dit proces heeft twee stappen. In een eerste stap worden de randen opgesmolten met bijv. de rand van een spiegellas of een warme staaf. Wanneer de rand van het sandwichpaneel voldoende diep is opgesmolten (+1,5 cm diep), kunnen beide zijden naar elkaar worden gebracht tijdens een dichtduw proces om vervolgens af te koelen. In het project zijn deze randafwerkingsstappen steeds manueel uitgevoerd, automatisatie is mogelijk wanneer een grote reeks panelen moet afgewerkt worden op deze manier. Wanneer het gewenst is om de panelen ook te plooiën, gebeurt dit best na de randafwerkingsstap.

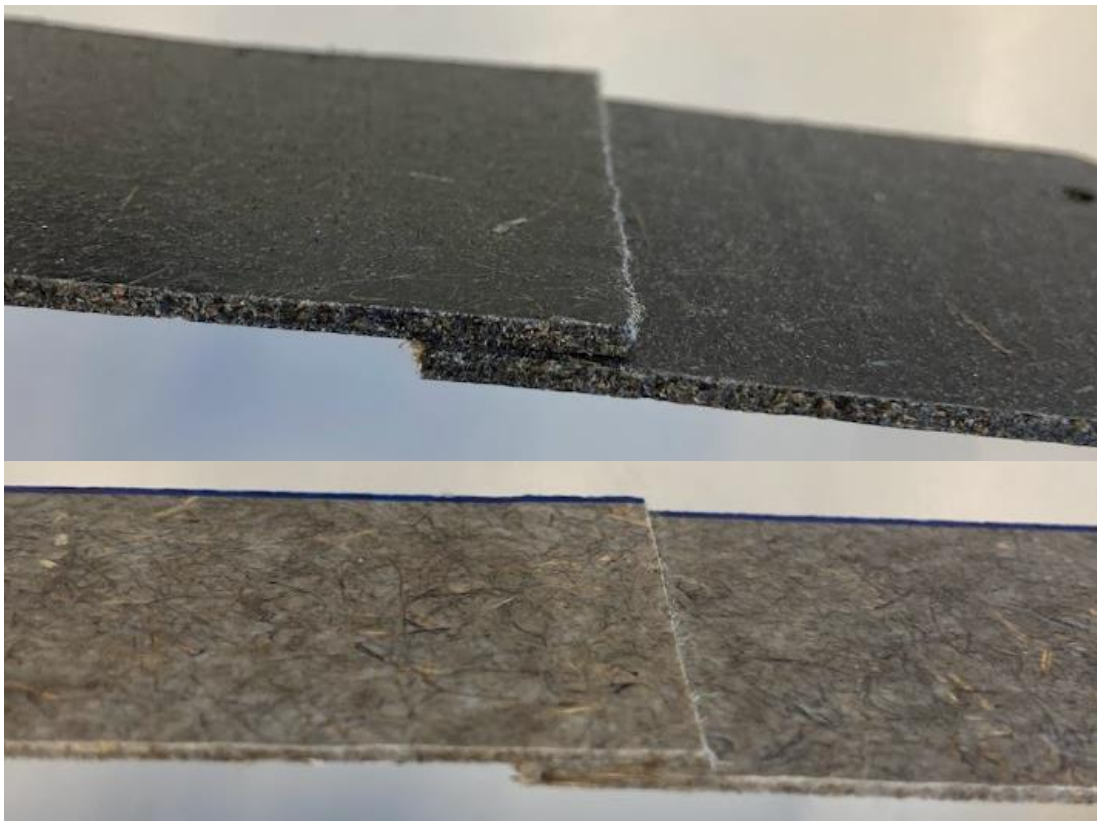


Figuur 6: Het dichtlassen van sandwichpanelen als randafwerking voor de kruk en opstapdemonstrator, eerste set-up op kleine schaal



Figuur 7: Het dichtlassen van sandwichpanelen als randafwerking voor de kruk en opstapdemonstrator, set-up op grotere schaal

Naast sandwichpanelen is in het project ook non-woven plaatmateriaal aan elkaar gelast met een spiegelassverbinding. Eerste testen zijn op een gelijkaardige manier uitgevoerd als op Figuur 4 toont. Figuur 8 toont het resultaat van hennep-PP en vlas-PLA non-woven platen die aan elkaar zijn gelast met de spiegelassmethode.



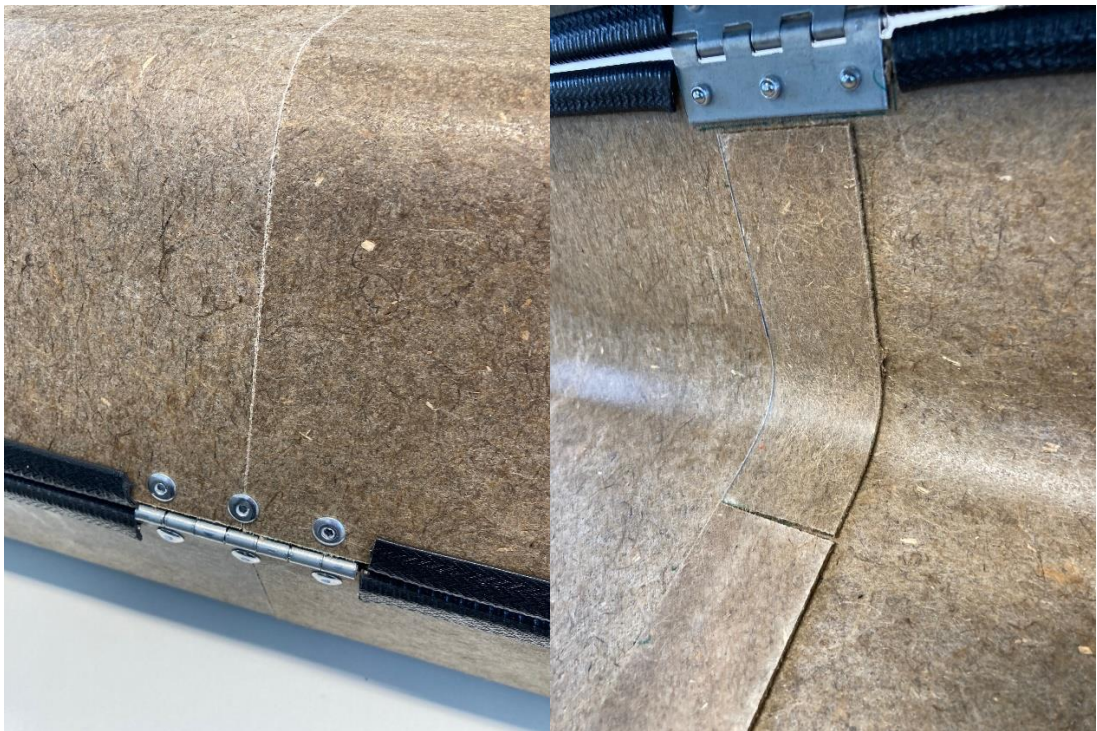
Figuur 8: Voorbeeld van een lasverbinding tussen non-woven biocomposieten hennep-PP (bovenaan) en vlas-PLA (onderaan)

Bovenstaande testen dienden als proof of concept dat is toegepast in de dakkoffer demonstrator van het BREPLA-project. Figuur 9 toont de finale dakkoffer demonstrator uit het project. Deze demonstrator is opgebouwd uit een onderkant en bovenkant, verbonden

met scharnieren. De onder- en bovenkant is telkens opgebouwd uit twee stukken die verbonden zijn door middel van de spiegellasmethode. De toevoeging van een extra laag aan de binnenkant van de dakkoffer zorgt voor de verbinding, Figuur 10 toont dit principe. Hierbij wordt de overlap laag opgewarmd op een warme plaat tot 200°C en tegelijk de hechtzone opgesmolten door middel van warme lucht. De verbinding is bekomen door beide opgesmolten zones tegen elkaar te duwen en het geheel op deze manier te laten afkoelen. In het BREPLA-project zijn deze spiegellasmethodes steeds manueel uitgevoerd. Wanneer materiaaltype, -dikte en het product constant blijft, is het mogelijk om deze technieken deels of volledig te automatiseren.



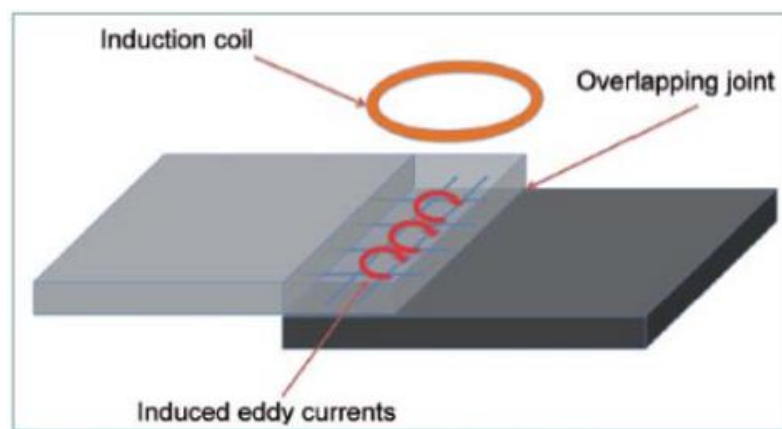
Figuur 9: De dakkoffer demonstrator uit het BREPLA-project



Figuur 10: De gelaste overlapverbinding in de dakkoffer demonstrator uit het BREPLA-project

2.2 Inductielassen

Naast spiegellastesten zijn eerder binnen Sirris ook inductielastesten op biocomposieten uitgevoerd. Inductielassen is enkel mogelijk met niet elektrisch geleidend materiaal. Figuur 11 toont het principe van deze assemblagetechniek. Bij deze techniek wordt een geleidend oppervlak tussen de te verbinden onderdelen geplaatst. Vervolgens induceert een inductie spoel lokale elektrische stromingen, eddy currents, in het geleidend oppervlak waardoor dit opwarmt en de thermoplastische matrix doet smelten. Wanneer tegelijk druk wordt aangelegd, kan een goede lasverbinding bekomen worden. Voor biocomposieten kan de middenlaag bestaan uit een metalen gaas of een laagje koolstofvezels. Het kan een nadeel zijn om deze synthetische materialen toe te voegen, het voordeel is echter dat de verbinding makkelijker uit elkaar te halen is. Figuur 12 toont de inductiegenerator en spoel die gebruikt zijn tijdens het uitvoeren van de testen. Voor deze proof of concept testen is gebruik gemaakt van een stalen gaas als op te warmen tussenlaag.

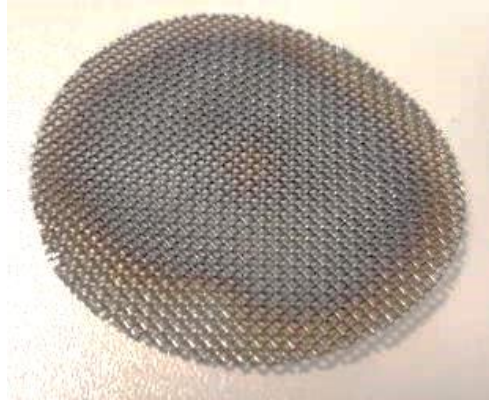


Figuur 11: Het concept van inductielassen generiek geïllustreerd



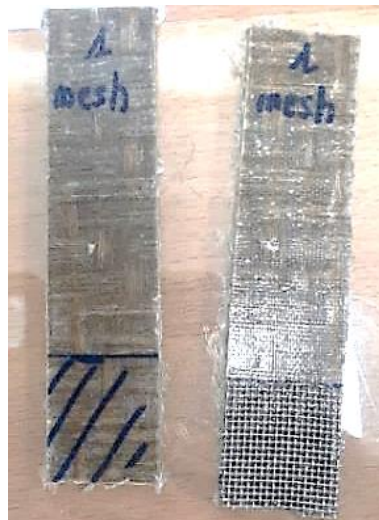
Figuur 12: Inductiegenerator (Cobes) en spoel die gebruikt zijn om onderstaande testen uit te voeren

Tijdens een eerste test is de opwarming van het gaas getest. Figuur 13 toont het gaas na deze inductietest. Hierop is te zien dat het gaas verkleurt en op deze manier de verschillende temperatuurzones aangeeft die tijdens de opwarming bereikt worden. Vanwege het gebruik van een vlakke pannekoekspoel zijn de temperatuurzones cirkelvormig waarbij in het midden de maximale opwarmtemperatuur niet bereikt wordt.

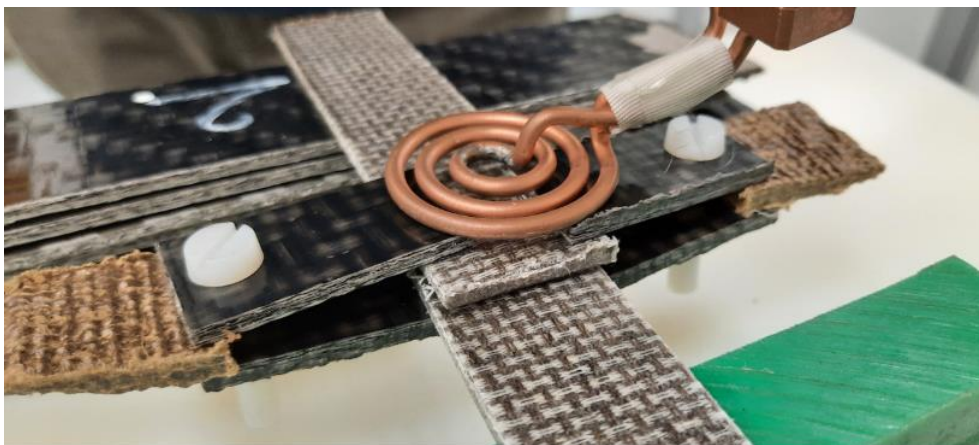


Figuur 13: Stalen gaas na opwarming met de pannenkoekspoel

In een volgende test zijn enkelvoudige overlapverbindingen gevormd. Hierbij zijn zowel vlas-PLA samples als vlas-PP samples aan elkaar gelast. Figuur 14 toont hoe de samples zijn voorbereid. Als overlapoppervlak werd steeds een oppervlak van zo'n 25 x 25 mm gebruikt. Figuur 15 toont hiernaast de opstelling waarmee de inductielas is bekomen. De opwarming wordt voorzien met de pannenkoekspoel die het sample zonder aanraking opwarmt. Hiernaast is het sample ingeklemd om tijdens het lasproces druk te garanderen wanneer het polymeer opsmelt. Deze inklemming bestaat in dit geval uit glasvezel-PP plaatjes. Het is belangrijk dat dit materiaal geen interactie heeft met de inductiespoel.



Figuur 14: Voorbeeld van een vlas-sample voor de enkelvoudige overlapverbinding met de inductielas techniek



Figuur 15: Opstelling tijdens inductielas testen met vlakke spoel

Na het lasproces is een afschuiftest uitgevoerd op de enkelvoudige overlapverbinding van deze samples. Hierbij worden de overlapte plaatjes uit elkaar getrokken in een trekbank. Figuur 16 toont hoe de overlapoppervlaktes eruit zien na de afschuiftest. Dit beeld bevestigt de variatie in opwarmtemperatuur wat eerder via de verkleuringszones van het metalen gaas in Figuur 13 te zien was. Zo is te zien dat hechting aan de rand van de interface van goede kwaliteit was, aangezien de falingsoppervlaktes eruit zien als een vlakke, gladde oppervlakte. In het midden van de falingsoppervlaktes is te zien dat de falingsoppervlaktes eruit zien als een ruwe, onregelmatige oppervlakte. Deze slechtere hechting is te verklaren door de lagere opwarmtemperatuur van deze zone. Beweging van de spoel over de hechtingszone zal de verwarming homogeniseren en dit probleem verhelpen.



Figuur 16: Overlapoppervlaktes van de vlas-PLA samples na afschuivingstest op de trekbank

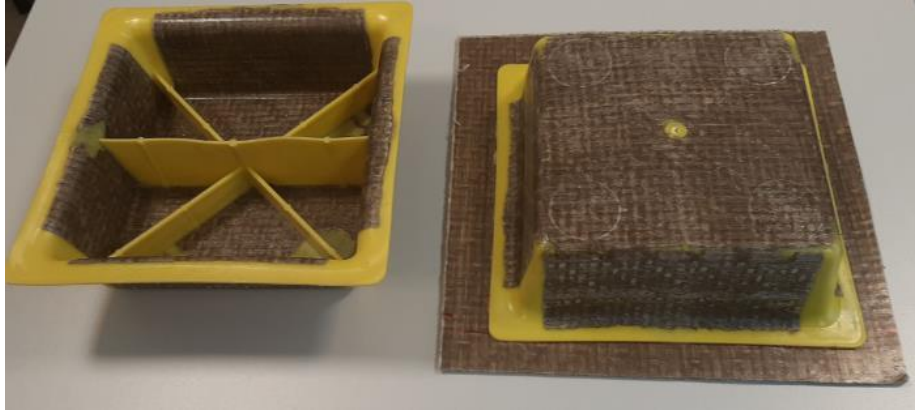
Tabel 1 toont met de maximaal bereikte kracht, sterkte en maximale vervorming de resultaten van de mechanische testen. De gemiddelde sterkte is relatief laag. Dit is te verklaren door de slechtere hechting in het midden van de overlap. Hiernaast vertonen deze testen een hoge standaarddeviatie. De verwachting is dat dit verbetert wanneer de spoel over het hechtingsoverlap beweegt om een meer homogene laskwaliteit te bereiken in de assemblage zone.

Tabel 1: Resultaten van de afschuivingstest op de trekbank

Vlas-PLA	Max. kracht (N)	Sterkte (MPa)	Vervorming (mm)
1	2414,00	3,75	0,99
2	1772,72	2,48	1,04
3	1850,13	2,97	1,33
4	2664,26	5,12	1,81
5	2446,65	4,21	1,69
Gemiddelde	2229,55	3,71	1,37
St. Dev.	394,58	1,04	0,37

Dit concept van inductielassen werd ook getest voor de assemblage van een plaat op een 3D-stuk, zie Figuur 17. Om een goede homogene verwarming in de hechtingszone te bekomen, werd de spoel manueel langs de laslijn bewogen. De sterkte van deze inductielasverbinding is getest op een trekbank, zie Figuur 18. Deze test geeft als resultaat een maximale kracht van 1400 N en dus een maximale belasting van 140 kg.

Deze test toont, samen met de reversibiliteit van deze verbinding, het potentieel van inductielassen voor deze materialen.



Figuur 17: 3D-stuk en vlakke plaat voor een proof of concept inductielas test



Figuur 18: Mechanische sterkte test van de inductielasverbinding in de trekbank

Conclusie

Hoofdstuk 1 toont een overzicht en ontwerprichtlijnen voor de verschillende types verbindingen bij composieten, overloopt hierbij voor- en nadelen en vertelt hoe met de nadelen kan worden omgegaan.

Zo wordt bij gebruik van mechanische verbindingen best aandacht besteed aan de minimalisatie van spanningsconcentraties rond de verbinding. Een juiste plaatsing en dimensies van de gaten, quasi-isotrope lay-up en toevoeging van inserts kunnen helpen om spanningsconcentraties te beperken. Een ander nadeel van mechanische verbindingen is het extra gewicht. Hiernaast bieden mechanische verbindingen ook enkele voordelen. Zo zijn deze verbindingen reversibel wat het makkelijk maakt om aparte onderdelen te vervangen. Ook kan de kwaliteit van deze verbindingen, op basis van de voorspanning, makkelijk en niet-destructief gecontroleerd worden.

Wanneer lijmverbindingen mogelijk zijn bij composieten, worden deze vanwege lagere spanningsconcentraties vaak verkozen boven mechanische verbindingen. Het design en de voorbereiding van de lijmverbinding zijn echter cruciaal. Zo kan de lijmverbindingen het meeste kracht opnemen bij een afschuifbelasting en worden pelspanningen loodrecht op de verbinding best vermeden. Nadelen aan lijmverbindingen zijn dat de kwaliteit wordt bepaald door goed vakmanschap, een voorbehandeling vaak vereist is, een kwaliteitscheck destructief is en dat de kwaliteit beïnvloed wordt door de omgevingscondities tijdens de aanbrenging.

Hiernaast is het ook mogelijk om verbindingen thermoplastisch te lassen. Voordelen van thermoplastische lasmethodes zijn de automatiseerbaarheid, de lassnelheid en de mogelijkheid om een verbinding te maken zonder toevoeging van extra materiaal. Nadelen zijn dat deze technieken minder flexibel en moeilijker op te schalen zijn dan mechanische en lijmverbindingen. De demonteerbaarheid van de verbindingen is afhankelijk van de lastechniek.

Hiernaast overloopt Hoofdstuk 2 concrete proof of concept testen rond spiegellassen en inductielassen. De spiegellastechniek is eenvoudig en kwalitatief uit te voeren en is toegepast in zowel de opstap, kruk als dakkoffer demonstrator.

De inductielas techniek is toegepast op vlas-PLA composiet waarbij een stalen gaas is toegevoegd als interface. Uit de testen blijkt dat de spoel best beweegt over de hechtingszone om een homogene opwarming te bekomen. Als proof of concept zijn een 3D-stuk en een vlakkeplaat aan elkaar gelast met behulp van deze techniek.

De resultaten van de spiegellas- en inductielastestesten tonen het potentieel van lasverbindingen bij thermoplastische biocomposieten.

Referenties

- [1] R. Nijssen, "Hoofdstuk 5 Verbindingen," in *Composieten Basiskennis*, Hogeschool Inholland, 2013, pp. 95-106.
- [2] R. Van de Ven, "Figuur 9.4," in *Composietmaterialen*, Houten, Stam Techniek, 1993, p. 166.
- [3] J. SCHÖN, "Fatigue of bolted composite joints," in *Composite Joints and Connections Principles, Modelling and Testing*, Stockholm, Woodhead Publishing, 2011, pp. 245-256.