



# BREPLA

Biobased fibre REinforced PLAstics

## Leverbaarheid 6.1.1

## Ontwerpguidelines voor biocomposieten

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

## Inhoudstafel

1	Introductie .....	4
2	Het ontwerpproces voor (bio)composieten.....	5
2.1	Opstellen van het product doel en de specificaties .....	5
2.2	Materiaalselectie.....	6
2.3	Lay-up optimalisatie.....	8
2.3.1	Zelf inschatten van laag- en laminaateigenschappen via mengregels.....	8
2.3.2	Vezelstructuur en vezeloriëntatie .....	9
2.3.3	Vezelvolumefractie.....	11
2.4	Veiligheidsfactoren .....	12
2.5	Falingscriteria.....	12
3	Aandachtspunten tijdens (bio)composietdesign .....	13
3.1	Algemene aandachtspunten en opmerkingen.....	13
3.2	Post-processing vs net-shape production.....	14
3.3	Gebruik van oppervlakte lagen.....	14
3.4	Ontwerp van verbindingen.....	14
3.4.1	Mechanische verbindingen .....	15
3.4.2	Lijmverbindingen .....	16
3.4.3	Lassen van thermoplastische composieten .....	17
3.5	Moulding.....	18
3.6	Koppelingseffecten .....	22
3.7	Vuistregels voor een goede laminaatopbouw [18].....	23
4	Ontwerpen met biocomposieten .....	23
5	Tools voor structureel ontwerp .....	23
5.1	Laminaat calculators .....	24
5.1.1	eLamX <sup>2</sup> .....	24
5.1.2	Andere calculators.....	24
5.2	Eindige elementen software.....	25
6	Conclusie .....	26
7	Bijlagen.....	27
7.1	Lijst productvereisten voor tijdens de designfase.....	27
8	Referenties .....	29

## Lijst met figuren en tabellen

### Figuren

Figuur 1: Lijst productvereisten voor tijdens de designfase, eerste deel. Bijlage 7.1 omvat de volledige tabel .....	6
Figuur 2: Vergelijking specifieke sterkte (kNm/kg) en specifieke stijfheid (MNm/kg) tussen een enkele koolstofvezel en koolstofvezelcomposietlagen met een verschillende vezelstructuur en oriëntatie .....	10
Figuur 3: Verloop van de trek- en afschuifmodulus van een UD-composietlaag in functie van de vezeloriëntatie [1] .....	10
Figuur 4: 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 .....	15
Figuur 5: Voorbeelden van goed en slecht ontwerp van een lijmverbinding [4] .....	16
Figuur 6: Verschillende ontwerpen van lijmverbindingen met het afschuifspanningsverloop en de relatieve sterkte hiervan [5] .....	17
Figuur 7: Voorbeelden van draft angles bij een mannelijke, $a$ , en een vrouwelijke mal, $b$ [6] .....	19
Figuur 8: Voorbeeld van een combinatie mal als oplossing voor de productie van een product met een negatieve draft angle [6] .....	20
Figuur 9: Voorbeeld van een te scherpe hoek in de mal en een hierdoor veroorzaakte brug tijdens productie [6] .....	21
Figuur 10: Voorbeeld van koppelingseffecten bij een trekbelasting [4] .....	22
Figuur 11: Voorbeeld van een gebalanceerd maar asymmetrisch laminaat met koppelingseffecten [18] .....	22

### Tabellen

Tabel 1: Analytische formules volgens de mengregel om de sterktes en stijfheden te berekenen voor een composieten laag [1] .....	8
Tabel 2: Analytische formules volgens de mengregel voor de afschuifmodulus en de poisson ratio voor unidirectionele composieten .....	9
Tabel 3: Typische vezelvolume fracties afhankelijk van het productieproces .....	11
Tabel 4: Invloed van de vezelstructuur op de mogelijke vezelvolume fracties [1] .....	11

## 1 Introductie

Intrinsieke materiaaleigenschappen zijn belangrijke inputgegevens voor het productontwerp. Dit verslag legt uit hoe een ontwerper deze input verwerkt in een optimaal productdesign. De lezer krijgt een overzicht van design guidelines en aandachtspunten die kunnen worden toegepast tijdens het productontwerp van (bio)composieten.

Zo geeft Hoofdstuk 2 richtlijnen hoe het ontwerpproces gestructureerd aangepakt kan worden. Dit hoofdstuk overloopt het ontwerpproces vanaf productdoel tot lay-up optimalisatie en geeft meer uitleg over veiligheidsfactoren en falingcriteria die typisch gebruikt worden voor composieten. Hiernaast lijst Hoofdstuk 3 typische aandachtspunten voor composietontwerp op. Aangezien veel guidelines voor biogebaseerde composieten gelijkaardig zijn aan die voor synthetischcomposiet, beschrijven Hoofdstuk 2 en 3 guidelines voor composieten in het algemeen. Hoofdstuk 4 legt kort uit hoe tijdens het ontwerpproces kan omgegaan worden met de verschillen tussen synthetische en biogebaseerde composieten. Hoofdstuk 5 toont tot slot hoe tools kunnen helpen om laminaatoptimalisaties uit te voeren, hierbij worden zowel laminaatcalculators als eindige elementen software besproken.

## 2 Het ontwerpproces voor (bio)composieten

Het ontwerp van (bio)composieten kan ingewikkeld zijn. Om het ontwerp te vergemakkelijken is het zinvol om dit stapsgewijs aan te pakken startend van het opstellen van het product doel en de productspecificaties om vervolgens het geschikte materiaal en proces te selecteren. Eenmaal het materiaal en productieproces gekend zijn, is het nodig om laagopbouw en procesdetails verder te gaan uitwerken en optimaliseren. Dit hoofdstuk geeft richtlijnen hoe het ontwerpproces gestructureerd aangepakt kan worden startend vanaf het product doel tot en met de lay-up optimalisatie. Wanneer bepaalde aspecten meer uitleg vereisen, wordt verwezen naar volgende hoofdstukken die hier verder op in gaan.

### 2.1 Opstellen van het product doel en de specificaties

Bij het ontwerp van een product is het belangrijk om het doel van het product met de vereiste functionaliteiten op te lijsten waar het product moet aan voldoen. Naast de doelen zijn ook de randvoorwaarden en beperkingen cruciaal om zo goed mogelijk te definiëren in het begin van de ontwerpfase. Zo moeten volgende thema's zo goed mogelijk geconcretiseerd worden:

- Beschrijving van het product
- Geometrie- en gewichtsvereisten
- Omgevingsbestendigheid
- Optische, thermische en elektrische vereisten
- Oppervlaktekwaliteit
- Maximale belasting
- Acceptabele falingsmodes
- Minimale levensduur
- Maximale kostprijs
- Kwaliteitscontrole en te volgen regelgeving

Om een zo volledig mogelijke beschrijving te krijgen van het productdoel en de voorwaarden heeft Sirris in een eerder project een tabel ontworpen die toelaat om de productvereisten zorgvuldig op te lijsten. Figuur 1 toont het eerste deel van deze tabel, de volledige tabel is terug te vinden in Bijlage 7.1. Deze tabel kan daadwerkelijk gebruikt worden of kan dienen als inspiratie om te definiëren wat de belangrijke eisen zijn voor het te ontwerpen product.

Om later de optimale materiaal en proceskeuze te maken zijn, naast eerder opgesomde productvereisten, het productie-aantal/volume en de productieduur van belang. Ook kunnen de vereiste eindelevensscenario's worden opgesteld om hierop reeds vanaf de designfase rekening mee te kunnen houden (hergebruik van materiaal tijdens productie, hergebruik van onderdelen, biodegradeerbaarheid, recycleerbaarheid, ...).

		Value	Flexibility	Comment				
<b>1 Introduction</b>								
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ This checklist is a document to be discussed jointly by the design office and the client in order to assure that the design office correctly understands the development framework for the part to be designed.</li> <li>■ It is advised to assign attributes to the specifications that indicate whether they are rigid or open for discussion:               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ rigid, not negotiable:</li> <li>■ flexible, open for discussion:</li> <li>■ soft, desirable attribute:</li> </ul> </li> </ul>								
<b>2.1 Description of the part</b>								
<b>2.2 Geometry and weight</b>								
<b>2.2.1 Shape, space envelope</b>								
■ Are the shape and the space envelope of the part already fixed? What are the limits?								
<b>2.2.2 Tolerances</b>								
■ Thickness tolerances?								
■ Shape tolerances?								
■ Tolerances for interface positions (see 2.2.3)								
■ What thermal expansion effects are tolerated? (e.g. resulting mismatch at load points)								
<b>2.2.3 Interfaces</b>								
■ Is the part assembled to other parts?								
■ Is the design of these other parts fixed?								
■ Which materials are used for the other parts?								
■ How are the parts assembled (permanently/temporarily)?								
■ What assembly tolerances have to be respected?								
<b>2.2.4 Weight</b>								
■ What is the target weight?								
■ What is the maximum weight?								

Figuur 1: Lijst productvereisten voor tijdens de designfase, eerste deel. Bijlage 7.1 omvat de volledige tabel

## 2.2 Materiaalselectie

Wanneer de productvereisten en -specificaties vorm krijgen, kan in de volgende stap de materiaal- en proceskeuze beschouwd worden. Dit gaat samen met een verdere concreetmaking van het product design.

Zo hangt de materiaal- en proceskeuze af van volgende productdesign aspecten:

- Welke (range) materiaaldiktes zijn mogelijk/waarschijnlijk?
- Zijn er vereisten voor de gebruikte radii in het product?
- Is het mogelijk/waarschijnlijk om ribben, holle secties of een sandwich structuur te gebruiken in het product?
- Mogelijke toevoegingen van ribben, holle secties, het toevoegen van een sandwich structuur, inserts,
- Welke verbindingen zijn gewenst/vereist? Zijn inserts mogelijk of vereist?
- Wat is het gewenste belastingsverloop en -overdracht in het product?

Ook voor de selectie van het geschikte materiaal is het belangrijk om enkele vragen concreet te maken:

- Komen (bio)composiet materialen in aanmerking voor dit product? Wat is de meerwaarde tegenover andere materialen? Wat zijn de voordelen van andere materialen tegenover (bio)composieten?
- Welke vezels zijn vereist: natuurlijke vezels, glasvezels, koolstofvezels, zelfversterkte polymervezels, ... ?

- Welke vezel-matrixstructuur is mogelijk voor de composiet materialen in het product? Korte vezels in compound (mm-schaal), korte vezels in non-woven (cm-schaal), lange vezels als weefsel, garen of UD-tape (continue)?
- Welk polymeer is geschikt: Thermoharder of thermoplast? Is biocontent een pluspunt? Biodegradeerbaarheid vereiste?
- Is er een extra oppervlakte laag vereist/mogelijk: Gelcoat, pigment, verf, ... ?

Het overlopen en bedenken van antwoorden (concreet of een range aan mogelijkheden) op deze vragen zorgt naast de oplisting van productvereisten voor extra randvoorwaarden wat de materiaal- en proceskeuze vergemakkelijkt.

Wanneer de lijst met productvereisten en deze antwoorden bij elkaar worden genomen, kan het geschikte materiaal en productieproces worden geselecteerd dat zo goed mogelijk voldoet aan alle randvoorwaarden.

Indien de materiaalkeuze hierbij te complex is, kan het helpen de beslissing te maken door een multi-criteria methode op te stellen:

- Bepaal de belangrijkste selectiecriteria
- Bepaal de verdeling in gewichtsfactoren die elk selectiecriteria krijgt
- Bepaal de score voor de mogelijke materialen
- Rang de materialen volgens hun score en selecteer het meest geschikte materiaal

Voor de materiaalselectie kan gebruik gemaakt worden van een expert systeem. Een expert systeem bevat veel info over een grote reeks aan materialen. Aan de hand van zoekcriteria kan de gebruiker vervolgens de meest geschikte materialen te weten komen en rechtstreeks met elkaar vergelijken.

In een betalende tool zoals CES Selector van Granta zijn deze stappen bijvoorbeeld in de software verwerkt om het selectieproces meer te automatiseren en rechtsreeks te koppelen aan een database aan materiaaleigenschappen. Naast betalende tools is het ook mogelijk om gratis tools te gebruiken zoals Matweb en Campusplastics om een vergelijking te maken in materiaaleigenschappen.

Wanneer voor het productieproces de keuze te complex is, kunnen de belangrijkste randvoorwaarden voor de keuze van het productieproces samengevat worden in 9 onderwerpen:

- Productvorm en -grootte
- Productiehoeveelheid
- Gereedschaps- en malkosten
- Chemische-fysische vereisten
- Mechanische vereisten
- Minimaliseren van de afwerkingsstappen
- Vereisten voor de verbindingen
- Vereisten voor de milieu-impact
- Vereisten eindlevensscenario's
- Totale kosten → zorgt typisch voor de eindbeslissing

## 2.3 Lay-up optimalisatie

Eenmaal het productieproces, de productgeometrie, het vezeltype, polymeertype en de vezelstructuur gekend zijn. Kan de lagenstructuur in het product geoptimaliseerd worden naargelang de mechanische belasting en randvoorwaarden. Zo is het belangrijk om in te schatten welke materiaaldikte en vezelfractie in het product vereist is om de mechanische belasting te dragen en wat de optimale vezeloriëntatie is.

Een goede inschatting van de spanningsverdeling in het product tijdens belasting is cruciaal voor een juiste optimalisatie van de lagenstructuur. Mechanische eindige-elementen simulaties kunnen hierin inzicht geven. Wanneer de productbelasting voldoende vereenvoudigd kan worden, is het ook mogelijk om de optimalisatie manueel uit te rekenen via analytische formules of eenvoudige tools te gebruiken gebaseerd op de klassieke laminaat theorie. Deze berekeningen zijn enkel mogelijk als de stijfheden en sterktes van elke laag afzonderlijk bekend zijn. Hoofdstuk 5 overloopt welke tools bestaan om de spanningsverdeling in het product of productonderdeel in te schatten.

### 2.3.1 Zelf inschatten van laag- en laminaateigenschappen via mengregels

Zoals eerder gezegd zijn berekeningen van spanningsverdeling in een composieten product enkel mogelijk als de eigenschappen van elke laag afzonderlijk gekend zijn. Deze eigenschappen worden soms meegegeven door de producent. Als dit niet het geval is, kan dit berekend worden met benaderende analytische formules. Als input voor deze berekeningen zijn de stijfheden en sterktes van vezel en matrix, de vezelstructuur en de vezelvolumefractie vereist. Tabel 1 en 2 tonen formules die kunnen dienen om de eigenschappen van een composieten laag zo goed mogelijk te benaderen. De sterkte en stijfheid van de vezels is typisch veel hoger dan deze van de polymeermatrix. Hierdoor tonen de formules dat de eigenschappen van een composietlaag toenemen als de vezelvolumefractie verhoogt. Sectie 2.3.3 gaat verder in op typische vezelvolumefractie en wat dit beïnvloedt. Een inschatting van de vezel- en matrixeigenschappen kan meestal gemaakt worden via tools zoals CES selector, Matweb, Campusplastics of andere bronnen.

Tabel 1: Analytische formules volgens de mengregel om de sterktes en stijfheden te berekenen voor een composieten laag [1]

Composite Type	Property	Formula	
Unidirectional	Longitudinal elastic modulus	$E_{cl}$	$= E_m(1 - V_f) + E_f V_f$
	Transverse elastic modulus	$\frac{1}{E_{ct}}$	$= \frac{1-V_f}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$
	Longitudinal failure strength	$\sigma_{cl}^*$	$= \sigma_{m(f^*)}(1 - V_f) + \sigma_f^* V_f \approx \sigma_f^* V_f$
	Transverse failure strength	$\sigma_c^*$	$= \sigma_m^*$
	In-plane shear strength	$\tau_c^*$	$= \tau_m^*$
Woven	Elastic modulus	$E_c$	$= E_m(1 - V_f) + \frac{1}{2} E_f V_f$
Random mat	Elastic modulus	$E_c$	$= E_m(1 - V_f) + \frac{3}{8} E_f V_f$

Met  $E$  = stijfheid,  $\sigma$  = sterkte,  $\tau$  = afschuifsterkte,  $V_f$  = vezelvolumefractie, ...  $_{cl}$ : van een composietlaag in longitudinale richting parallel met de vezels, ...  $_{ct}$ : van een composietlaag in transversale richting loodrecht op de vezels, ...  $_m$  = van de matrix, ...  $_f$  = van de vezels



Tabel 2: Analytische formules volgens de mengregel voor de afschuifmodulus en de poisson ratio voor unidirectionele composieten

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f (1 - V_f) + G_m V_f}$$

$$v_{12} = V_f v_f + (1 - V_f) v_m$$

G = afschuifstijfheid,  
v = poisson ratio,  
... 12 = in het vlak

Deze formules zijn opgesteld volgens de mengregel die verschillende veronderstellingen maakt en het composiet ideaal voorstelt. Hierdoor zijn de bekomen waarden met deze formules typisch een bovenlimiet.

Veronderstellingen mengregel:

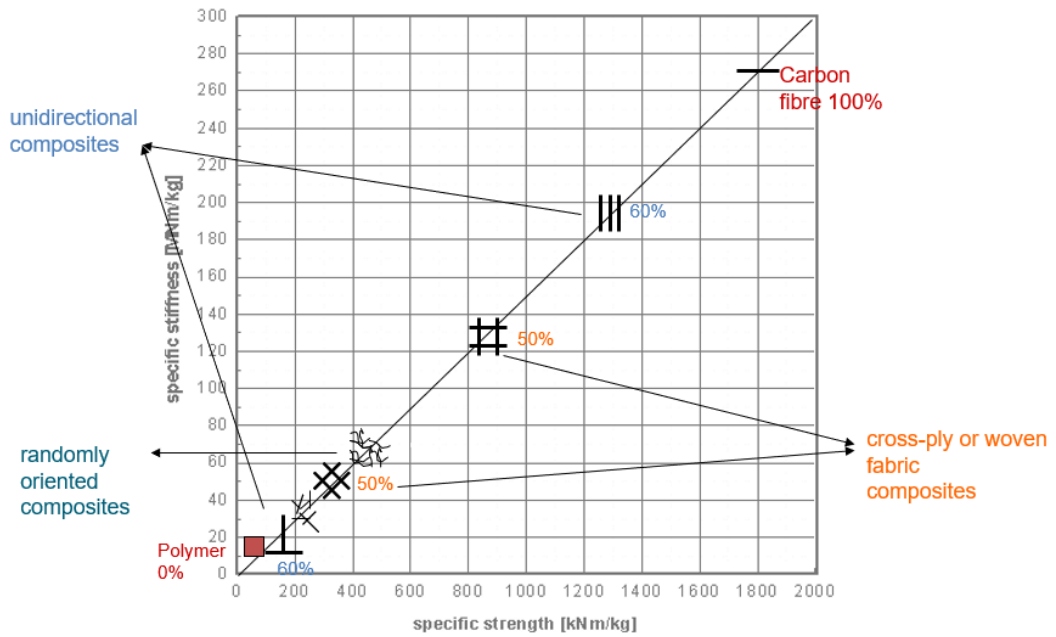
- Geen porositeiten of luchtinsluitels in het composiet
- Alle vezels zijn perfect gealigneerd
- Alle vezels zijn omgeven door de matrix
- Een perfecte vezel-matrix connectie

De mengregel kan ook doorgetrokken worden op laminaatniveau. Een eenvoudig voorbeeld van een [0/90/90/0]-laminaat uit UD-lagen heeft volgende modulus:  $E_{0^\circ, 90^\circ} = \frac{1}{2} * (E_1 + E_2)$ . Dit laminaat heeft dus dezelfde stijfheid in de 0° en 90° richting. In de +-45° richting zal de stijfheid echter een dip tonen. Om de variabiliteit van eigenschappen in de verschillende richtingen van het vlak af te vlakken kan een drielaagige lay-up met lagen in volgende oriëntaties [+60/-60/0] of een vierlagige lay-up met lagen in volgende oriëntaties [+45/-45/0/90] gebruikt worden. Dit worden quasi-isotrope laminaten genoemd.

Zowel de berekening van de laageigenschappen en de laminaateigenschappen kunnen ook gebeuren via software tools. Hoofdstuk 5 gaat hier verder op in.

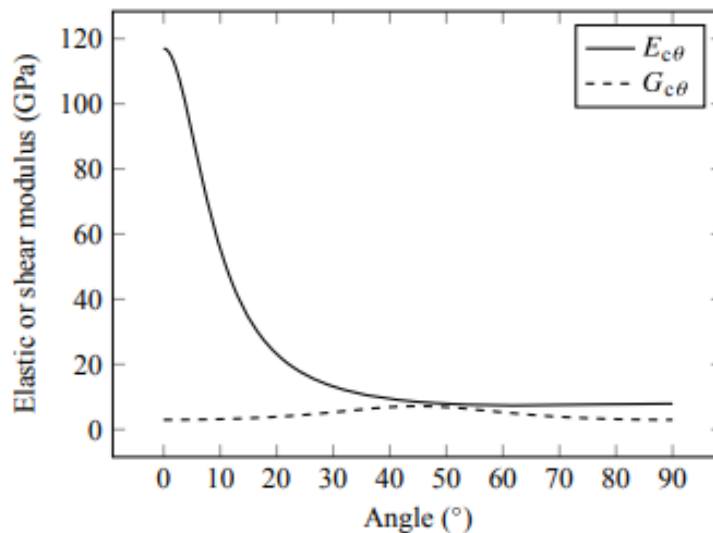
### 2.3.2 Vezelstructuur en vezeloriëntatie

Figuur 2 toont een voorbeeld van de invloed van vezelstructuur en vezeloriëntatie op de eigenschappen in één richting. Pure koolstofvezel vertoont de hoogste specifieke stijfheid en sterkte wanneer deze in vezelrichting wordt belast. De beste eigenschappen voor een structureel composiet materiaal worden bekomen wanneer de vezels allemaal parallel liggen in een unidirectioneel (UD) composiet. De 60%-waarde in de figuur duidt op de vezelvolumefractie die typisch bekomen wordt voor dit soort materialen. Dit UD-composiet vertoont deze waarden echter enkel in de vezelrichting. Voor een belasting loodrecht op de vezelrichting heeft dit materiaal een van de lagere eigenschappen voor composietmaterialen. Aangezien de vezels hierbij niet veel kunnen bijdragen tot de eigenschappen zijn de eigenschappen van UD-composieten die loodrecht belast worden vergelijkbaar met het gebruikt polymeer. Verder toont Figuur 2 dat een weefsel of cross-ply structuur gemiddelde eigenschappen geeft tegenover andere structuren. Composiet materiaal dat bestaat uit kortere vezels met willekeurige oriëntatie vertonen verder een lagere stijfheid en sterkte dan een weefsel. Een van de voordelen van composiet materiaal met willekeurige oriëntatie is dan weer dat er een kleinere variatie is op de eigenschappen in de verschillende richtingen van het vlak.



Figuur 2: Vergelijking specifieke sterkte (kNm/kg) en specifieke stijfheid (MNm/kg) tussen een enkele koolstofvezel en koolstofvezelcomposietlagen met een verschillende vezelstructuur en oriëntatie

Naast de invloed vezelstructuur op de stijfheid en sterkte toont Figuur 2 ook de invloed van de vezeloriëntatie. Het verschil voor UD-composiet met een belasting parallel en loodrecht aan de vezelrichting is reeds besproken. Figuur 2 toont echter dat de eigenschappen van een weefsel composiet dat belast wordt in een 45°-oriëntatie ook sterk dalen. Als aanvulling hierop toont Figuur 3 het verloop van de trek- en afschuifmodulus van een UD-composietlaag in functie van de vezeloriëntatie. Hierop is te zien dat de trekmodulus daalt met zo'n 50% als de belastingshoek verandert van 0° naar 10° tegenover de vezeloriëntatie. Naast de trekmodulus toont Figuur 3 dat de afschuifmodulus in het vlak het hoogst is bij een belastingshoek van 45°.



Figuur 3: Verloop van de trek- en afschuifmodulus van een UD-composietlaag in functie van de vezeloriëntatie [1]

### 2.3.3 Vezelvolumefractie

Eerdere secties gaven aan dat het weten van de vezelvolumefractie belangrijk is om de composiet eigenschappen in te schatten op laag niveau. Verder zorgt een hoge vezelvolumefractie typisch ook voor hoge mechanische eigenschappen.

Deze volumefractie is sterk afhankelijk van het gebruikte materiaal en het productieproces. Hoe meer het materiaal gecompacteerd kan worden in het productieproces, hoe meer een teveel aan matrix kan wegvloeien en dus hoe hoger uw vezelvolumefractie. Tabel 3 toont typische vezelvolumefracties die als vuistregel kunnen aangenomen worden bij de productie van thermohardende composieten.

Tabel 3: Typische vezelvolumefracties afhankelijk van het productieproces

Manufacturing method	$V_f$ typical (rule of thumb)
Wet layup	0.3–0.5
Vacuum bagging	0.4–0.6
Prepreg moulding	0.5–0.7

Tabel 3 toont dat hoe hoger de druk en compactie van het materiaal tijdens het proces, hoe hoger de vezelvolumefractie kan zijn. Dit geldt ook voor thermoplastische composieten, al wordt bij thermoplastische composieten de vezel-polymeer verhouding opvoorhand bepaald door een mengingstap opvoorhand.

Naast het proces bepaalt ook de vezelstructuur de mogelijke vezelvolumefracties. De polymeermatrix verspreidt zich namelijk makkelijker overheen UD-vezels dan bij een weefsel. Bij random vezels ondervindt de polymeermatrix de grootste weerstand tijdens het vloeien. Hierdoor kunnen UD-vezels een hogere vezelvolumefractie bekomen dan randomvezels. Tabel 4 toont de mogelijke vezelvolumefracties voor random vezels, een weefsel en UD-vezels.

Tabel 4: Invloed van de vezelstructuur op de mogelijke vezelvolumefracties [1]

Fibre form	Volume fraction ( $V_f$ )
Random	0.1–0.3
Woven	0.2–0.55
Unidirectional	0.3–0.7

Naast het op voorhand inschatten van de vezelvolumefractie is het ook interessant om na de productie te meten hoe groot de bekomen vezelvolumefractie is. Bij het meten van de materiaaldikte, kan je de vezelvolumefractie berekenen via de volgende formule:

Als je de dikte van het laminaat kent, het gewicht aan vezels per oppervlak doorheen het volledige laminaat en de vezeldensiteit kan je makkelijk de vezelvolumefractie bepalen via volgende formule:

$$t = \frac{n A_w}{\rho_f V_f} \quad \text{met } t = \text{materiaaldikte, } n = \text{aantal lagen, } A_w = \text{vezelgewicht per oppervlak, } \rho_f = \text{densiteit van de vezels en } V_f = \text{vezelvolumefractie}$$

Het is mogelijk dat de producent wel een gewichtsfractie weet, maar geen volumefractie van de vezels. Wanneer dichtheid van vezel,  $\rho_f$ , en matrix,  $\rho_m$ , gekend zijn of ingeschat kunnen worden, kunnen de vezelvolumefractie en gewichtsfractie eenvoudig worden omgezet via volgende formules:

$$V_f = \frac{\frac{W_f}{\rho_f}}{\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{1-W_f}{\rho_m}} \quad W_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + (1 - V_f) \rho_m}$$

## 2.4 Veiligheidsfactoren

De mengregels, besproken in 2.4.1, en tools voor structureel ontwerp, zie Hoofdstuk 5, laten toe om een inschatting te maken van het structureel gedrag van het product, namelijk de vervormingen en spanningen. Er zit echter een mate van onzekerheid in de materiaaleigenschappen, productiemethode en de mechanische belasting die op het uiteindelijke product zal inwerken. Hierdoor wordt typisch gewerkt veiligheidsfactoren. Deze veiligheidsfactoren stijgen wanneer de onzekerheden of de gevolgen van faling toenemen. De gekozen waarde ligt typisch tussen 1.2 en 4.0 [2]. Voor composieten wordt typisch met een hogere veiligheidsfactor ( $> 2.0$ ) gewerkt dan bij traditionele isotrope materialen.

Bij biocomposieten is er typisch een grotere variatie in materiaaleigenschappen dan bij synthetische composieten. Ook zijn plantvezels, zonder behandeling van het materiaal, gevoelig aan vocht waardoor de eigenschappen van het biocomposiet dalen. Deze verhoogde onzekerheid zorgt voor een verhoging in de gebruikte veiligheidsfactoren. Een manier om de onzekerheid deels te beperken is om zelf materiaalkarakterisatie testen uit te voeren. Hieruit kunnen de effectieve eigenschappen en de spreiding hierin van de materiaal-productie combinatie bepaald worden, wat de onzekerheid en dus de vereiste grootte van de veiligheidsfactoren doet dalen.

## 2.5 Falingscriteria

Wanneer de productsterkte ingeschat moet worden via de tools moet steeds een falingscriteria geselecteerd worden. Anders als bij metalen is het Von Mises criteria niet toepasbaar op composieten vanwege de anisotropie. Er bestaan heel wat andere falingscriteria voor structureel composiet design. Deze zijn onderverdeeld in drie groepen:

- Limiet of niet-interactieve theoriën (maximale spanning, maximale rek)
- Interactieve theoriën (Tsai-Hill, Tsai-Wu)
- Deels interactieve / falingsmode afhankelijke theoriën (Hashin-Rotem, Puck)

De geldigheid en toepasbaarheid van een bepaalde theorie hangt af van het gebruiksgemak en de overeenkomst met experimentele resultaten. [3]

Niet-interactieve falingscriteria maximale spanning en maximale rek kunnen een goede indicatie geven over de sterkte. Bij complexe belastingen is de nauwkeurigheid over het algemeen lager dan de andere theoriën en geeft het zowel een onder als overschatting afhankelijk van de belasting. Dit komt omdat deze falingscriteria de spanningen in de verschillende richtingen apart beschouwd.

Het Tsai-Hill criterium is meer uitgebreid dan de niet-interactieve theorieën. Het beschouwt de spanningen in verschillende richtingen te samen. Dit kan handmatig nagerekend worden wat de controle en het begrip van de gebruiker doet toenemen. Het Tsai-Hill criterium is gebaseerd op volgende formule:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{11}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X_{11}^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{22}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$$

Where:

$X_{11}$  is the allowable strength of the ply in the longitudinal direction (0° direction)

$X_{22}$  is the allowable strength of the ply in the transversal direction (90° direction)

$S_{12}$  is the allowable in-plane shear strength of the ply between the longitudinal and the transversal directions

Het Tsai-Wu criterium is uitgebreider en complexer dan het Tsai-Hill criterium en is veelvoorkomend in de sterkte berekening van composieten.

Het voordeel van deels interactieve / falingsmode afhankelijke theorieën (Hashin-Rotem, Puck) is deze samen met de sterkte voorspellen hoe het materiaal en dus onder welke falingsmode zal falen.

Het is moeilijk om een algemene conclusie te stellen voor de verschillende falingscriteria. Hierdoor is het aangeraden om bij de evaluatie van de belasting uit elke categorie één criteria te gebruiken, vervolgens het verloop van de falingsindex te bekijken, veiligheidsfactoren in te stellen en vervolgens een keuze te maken welk falingscriteria gebruikt wordt naargelang de hoeveelheid conservatisme gewenst is. [3]

## 3 Aandachtspunten tijdens (bio)composietdesign

### 3.1 Algemene aandachtspunten en opmerkingen

- Composieten onderdelen presteren het best zonder verbindingen
  - Vermijd zoveel mogelijk verbindingen in het design
- Composieten presteren beter onder trek dan onder druk
- Dikte veranderingen zijn moeilijker te produceren bij composieten dan bij metalen. Bij composieten werk je met ply drops waarbij het laminaat laag per laag afbouwt om zo een schuine rand te bekomen. Dit is complexer qua design en productie.
- Bij een composieten product design je zowel een materiaal als een product, dit zorgt voor meer vrijheidsgraden.
- Bij een composietproduct moet het productdesign reeds afgestemd zijn op de productiemethode.

### 3.2 Post-processing vs net-shape production

Voordelen van productie op maat:

- Extra afwerkingsstappen zijn vermeden
- Je reduceert het materiaal dat je aankoopt en stockeert, maar niet gebruikt.
- Geen risico op productbeschadiging tijdens nabewerking
- Alle vorm-eigenschappen zitten verwerkt in de mal, hierdoor komen minder fouten voor.

Nadelen van op maat gemaakte productie:

- Hogere mal- en andere toolingkosten
- Hogere complexiteit van het product, hierdoor complexere productie en meer engineering nodig
- Het proces wordt minder robuust

### 3.3 Gebruik van oppervlakte lagen

Nog niet eerder vernoemd maar wel belangrijk om mee rekening te houden is de mogelijkheid om een extra oppervlakte laag toe te voegen aan het (bio)composiet product. Een oppervlakte laag kan het product namelijk op verschillende vlakken verbeteren:

- Het verhogen van de UV-resistentie
- Verhogen van de slijtage en krasweerstand
- Verhogen van de waterbestendigheid, barrière voor osmose
- Barrière of toevoeging van de elektrische geleidbaarheid
- Verhogen van de glans, toevoegen van kleur

Een oppervlaktelaag bestaat in verschillende vormen en kan op verschillende manieren worden aangebracht. Zo is het mogelijk om een coating of film laag reeds in de mal aan te brengen en is het mogelijk om een verflaag aan te brengen na de productie.

### 3.4 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.

### 3.4.1 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.

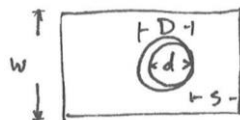
Om spanningsconcentraties zo veel mogelijk te beperken, is het belangrijk om bij het design van mechanische verbindingen rekening te houden met enkele richtlijnen aangegeven op Figuur 4. Om verder scheurvorming rond een mechanische verbinding zo veel mogelijk te beperken en de voortgang hiervan te verhinderen is het aangeraden om rond een mechanische verbinding steeds een quasi isotrope [+45/-45/0/90]<sub>s</sub> lay-up te gebruiken.

#### Recommendations:

$$s/D > 3$$

$$w/D > 5$$

$$D = d$$



Figuur 4: 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

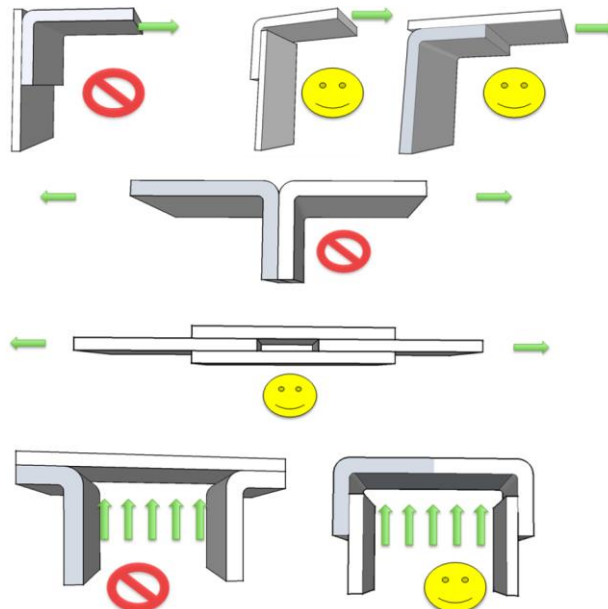
Voor verschillende mechanische verbindingen kan het zin hebben een stuk metaal, hout of composiet in de te verbinden onderdelen te bevestigen, dit wordt ook wel een insert genoemd. Deze inserts zorgen ervoor dat de spanningen die door de bout/schroef worden doorgegeven beter verdeeld worden en een betere 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 vloeï van de matrix beïnvloeden wat kan leiden tot meer laslijnen en droge plekken in het product. [4]

### 3.4.2 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 5 toont goed en slecht ontwerp van een lijmverbinding. [4]

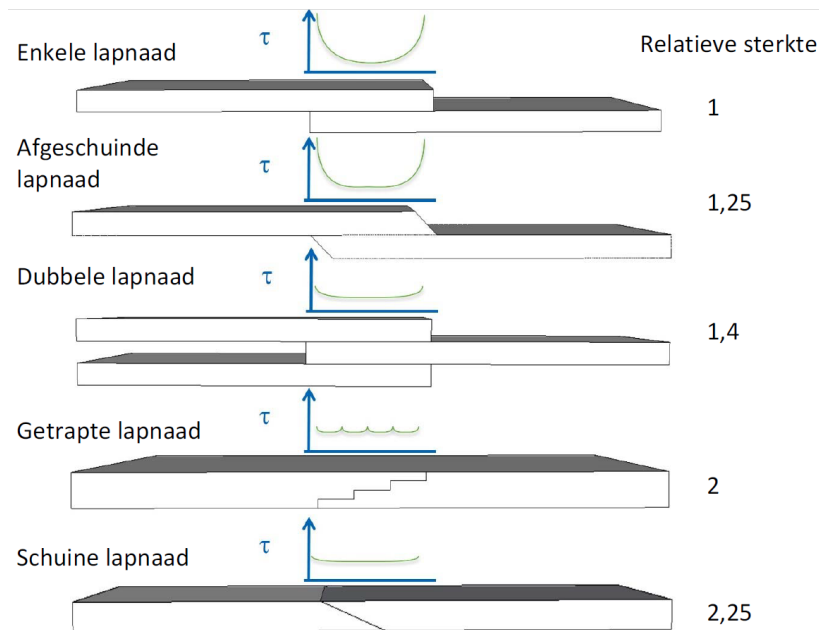


Figuur 5: Voorbeelden van goed en slecht ontwerp van een lijmverbinding [4]

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 6 toont het verloop van de afschuifspanning typisch verschilt 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 lijmoppervlakte, de invloed van de lijmoppervlakte op de spanningspieken neemt echter af naarmate de overlappende lengte groter wordt.





Figuur 6: Verschillende ontwerpen van lijmverbindingen met het afschuifspanningsverloop en de relatieve sterkte hiervan [5]

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 lijmtyper:

- 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. [4]

### 3.4.3 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 5. De spanningspieken zullen ook lager zijn bij een symmetrische verbinding en bij een geleidelijke dikte overgang, zie Figuur 6.

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.

### 3.5 Moulding

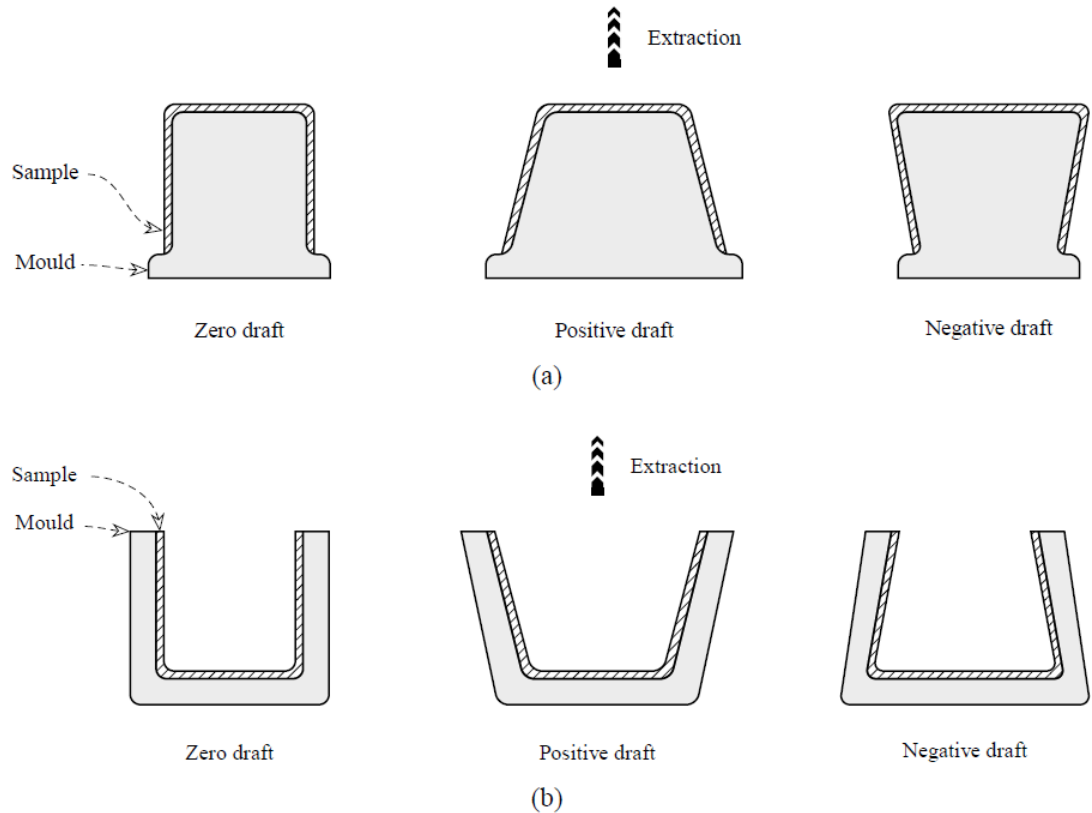
Om 3D structuren te maken uit composiet materiaal heb je meestal een mal nodig. Het ontwerp van de mal tijdens het ontwerp van het productieproces is hierbij cruciaal. De vorm en het ontwerp van de mal zal namelijk de finale productgeometrie en -kwaliteit bepalen. Ook zal er steeds een afweging moeten gemaakt worden tussen hoeveel details in de mal verwerkt worden en hoeveel afwerking er nodig zal zijn. Een vrouwlijke mal dient hierbij om tot een laminaat te komen met een glad bol oppervlak, een mannelijke mal zorgt voor een glad hol oppervlak. Om tot twee gladde oppervlakken te komen kan een dubbele mal gebruikt worden.

Het ontwerp van de mal is cruciaal, slecht malontwerp kan namelijk leiden tot:

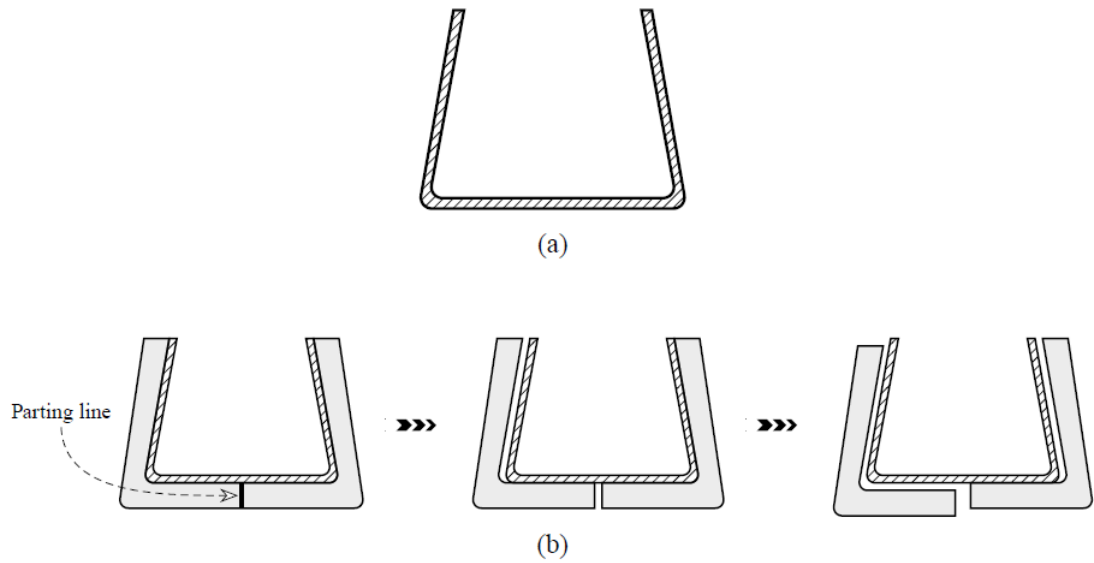
- Een onstabiel proces
- Verhoogd materiaal gebruik
- Slechte productkwaliteit
- Onverwachte parameter variaties
- Verhoogde slijtage van de mal

#### Draft angle

De draft angle is een belangrijke parameter om te zorgen dat het product goed ontmald kan worden. Dit is de hoek tussen de zijden van de mal en de ontmallingsrichting. Een positieve draft angle kan bijdragen tot een goede ontmalling en een grotere hoek tot minder wrijving en hierdoor minder slijtage van de mal. Een negatieve hoek kan ontmalling verhinderen of bemoeilijken. Figuur 7 toont enkele voorbeelden van verschillende draft angles bij een mannelijke en vrouwelijke mal. Met aanpassingen aan het malontwerp kan een product met een negatieve draft angle toch geproduceerd worden. Figuur 8 toont een mogelijke oplossing hiervoor door te werken met twee malhelften, een combinatiemal. Een andere mogelijkheid is door te werken met verwijderbare inserts.



Figuur 7: Voorbeelden van draft angles bij een mannelijke, a, en een vrouwelijke mal, b [6]



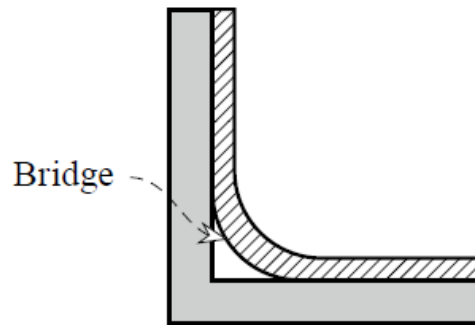
Figuur 8: Voorbeeld van een combinatie mal als oplossing voor de productie van een product met een negatieve draft angle [6]

Als algemene regel kan genomen worden dat voor ondiepe onderdelen tot 75 mm een draft angle van minimum 1° moet aangehouden worden. [7] Voor diepere onderdelen is een grotere hoek vereist. Hiervoor kan volgende formule gevolgd worden als vuistregel [8]:

$$\theta \geq \lceil 1 + \frac{\text{depth [mm]} - 75}{25} \rceil$$

### Scherpe hoeken

Scherpe hoeken in de mal kunnen leiden tot problemen en moeten hierdoor best vermeden worden in het malontwerp. Bij scherpe hoeken kan het namelijk voorkomen dat het laminaat de hoek niet volledig raakt en hierdoor een brug wordt gecreëerd door de vezels, Figuur 9 toont hier een voorbeeld van. Tijdens het productie proces kan hars zich opstapelen in de scherpe hoek wat tot een slechte kwaliteit leidt. Als absolute minimum wordt aangeraden om minstens een straal van 5 mm te gebruiken in het malontwerp. [9]



Figuur 9: Voorbeeld van een te scherpe hoek in de mal en een hierdoor veroorzaakte brug tijdens productie [6]

### Oppervlakte textuur

Een oppervlakte textuur wordt over het algemeen overgenomen van de mal tot op het composieten product, buiten fijne details. Indien mogelijk zijn gladde oppervlakken aangeraden. Dit zorgt namelijk voor een zo makkelijk mogelijke ontmalling. Het toevoegen van oppervlakte ruwheid zorgt voor een verhoging van het totaaloppervlak met hierdoor de kans dat de demontage moeilijker gaat verlopen en voor meer slijtage aan de mal zorgt. Wanneer toch een ruw oppervlak vereist is in het product, wordt best met grotere draft angles gewerkt [10]. In de literatuur wordt bijvoorbeeld verwezen naar een verhoging van de draft angle met  $1^\circ$  voor elke 0,0254 mm textuurdiepte [8]. [6]

### Materiaalkeuze van de mal

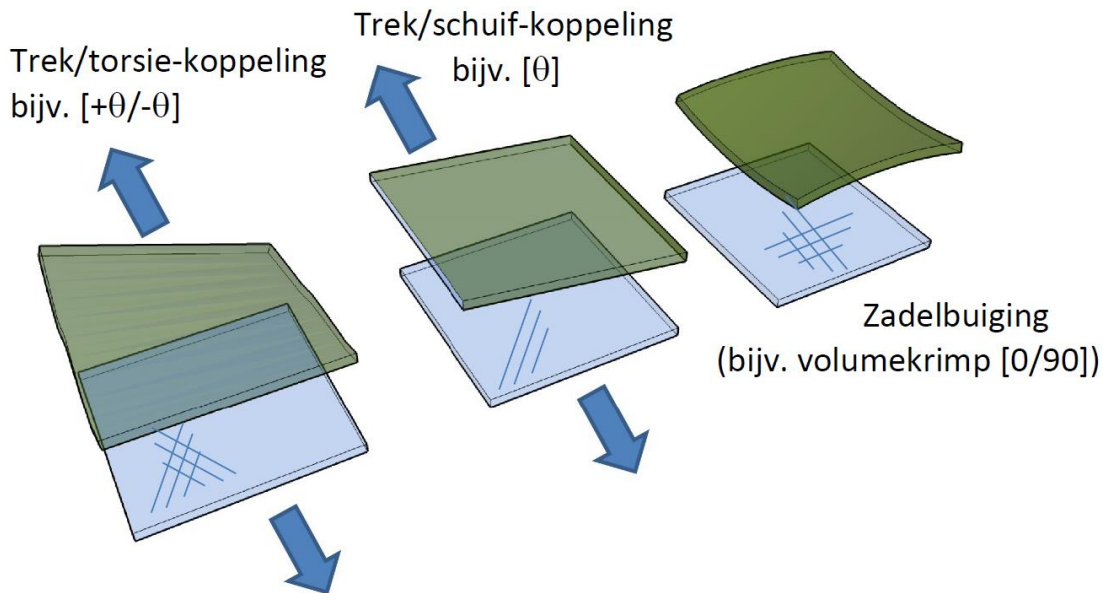
De gewenste levensduur van een mal kan sterk verschillen en is zeer belangrijk om te weten tijdens het malontwerp. Hiernaast wordt een mal typisch ontworpen om 3-4 keer stijver en sterker te zijn dan het uiteindelijk product [11]. Dit kan bekomen worden door de materiaalselectie, dikte van de mal en de toevoeging van eventuele ribstructuren.

Afhankelijk van het doel van de applicatie kan de gewenste levensduur van een mal verschillen vanaf éénmalig gebruik tot zolang mogelijk gebruik in serieproductie. Voor het maken van prototypes of lage volume productie (5-50 stuks) kunnen mallen uit gips, schuim en hout gebruikt worden [12], [13], [14]. Hiernaast bieden Silicone mallen een alternatief. Deze mallen zijn ideaal om een complexe geometrie aan te nemen en zijn geschikt voor lage volume productie. Andere methodes voor de productie van een mal voor lage volumes is het gebruik van een metalen of polymeren sheet of het de geometrie te laten 3D-printen. [15], [16].

Om hogere productievolumes te verwezenlijken is een composieten of metalen mal vereist. Hierbij zijn composieten mallen relatief gemakkelijk te produceren, goedkoper dan metalen mallen en duurder dan bijvoorbeeld gips, hout, schuim of silicone. Het gebruik van composieten mallen is geschikt voor lage tot gemiddelde productie volumes (tot honderden stuks) [17]. Bij hogere productievolumes (tot duizenden stuks) zijn harde metalen mallen vereist, deze zijn echter zwaarder en duurder dan de andere technieken.

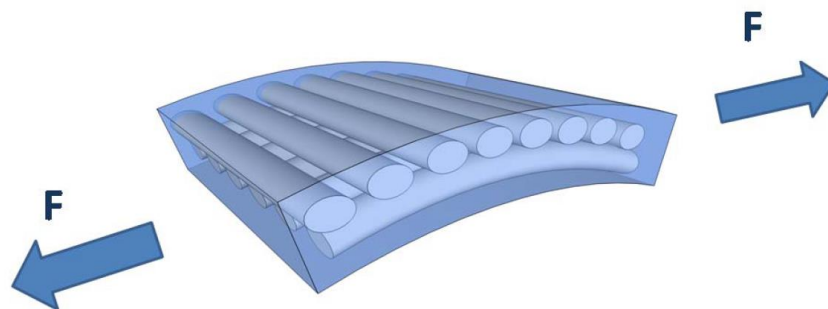
### 3.6 Koppelingseffecten

Koppelingseffecten zijn meestal ongewenste effecten die mogelijk zijn vanwege de anisotrope eigenschappen van de composieten lagen. Hierbij reageert het materiaal onintuïtief op een belasting. Figuur 10 toont hoe bijvoorbeeld een torsie, schuif of buig vervorming kan voorkomen tijdens een trekbelasting.



Figuur 10: Voorbeeld van koppelingseffecten bij een trekbelasting [4]

In sommige gevallen zijn deze koppelingseffecten gewenst, maar meestal zijn deze ongewenst. Koppelingseffecten komen voor wanneer laminaten niet symmetrisch en gebalanceerd zijn. Met symmetrisch wordt bedoeld dat in een composieten laminaat elke laag gespiegeld is tegenover de middelste laag. Hiernaast wordt met gebalanceerd bedoeld dat elke laag in een 'plus'-richting ook voorkomt in een 'min'-richting (zonder de  $90^\circ$  en  $0^\circ$  lagen). Figuur 11 toont bijvoorbeeld een  $[90,0]$ -laminaat. Wanneer aan het laminaat wordt getrokken zal de bovenste  $90^\circ$ -laag, met een lagere stijfheid in de trekrichting, meer kunnen uitrekken dan de onderste  $0^\circ$ -laag. Hierdoor trekt het laminaat krom. [18]



Figuur 11: Voorbeeld van een gebalanceerd maar asymmetrisch laminaat met koppelingseffecten [18]

### 3.7 Vuistregels voor een goede laminaatopbouw [18]

- Werk met symmetrische laminaten.  
Houd hier rekening mee wanneer laminaten op elkaar verlijmd worden tot een dikker laminaat.
- Werk met gebalanceerde laminaten.  
Hierbij is er voor elke lamel onder hoek  $x$  een lamel onder hoek  $-x$ .  
Een laminaat kan zowel symmetrisch als gebalanceerd zijn!
- Voorkom stijfheidssprongen tussen lamellen.  
Een manier om stijfheidssprongen te voorkomen is door de onderlinge vezelhoeken te beperken tot bijv.  $<60^\circ$  verschil.
- Vermijd onnodige lamelbeëindigingen (ply drops).  
Zorg bij verlijming van twee laminaten, dat de lijmlaag aangebracht wordt op lamellen die ten hoogste  $45^\circ$  afwijken van de hoofdrichting.
- Gebruik waar het kan quasi-isotrope laminaten.  
Een quasi-isotrope opbouw geeft de minste 'verrassingen' ... maar is vaak wel relatief zwaar.
- Vermijd abrupte diktesprongen...  
door eventuele lamel-einden (plydrops) één voor één te laten gebeuren;  
door deze lamel-einden niet te dicht bij elkaar te laten plaatsvinden;  
door lamel-einden met een lamel af te dekken.

## 4 Ontwerpen met biocomposieten

Het ontwerpproces met biocomposieten is zeer gelijkaardig als het ontwerpproces met synthetische composieten. Enkel is er een grotere onzekerheid in kwaliteit en eigenschappen van het startmateriaal en het resultaat na productie dan bij synthetische composieten. Deze kwaliteit is namelijk afhankelijk van:

- Het oogstproces bij plantvezels
- De droging van het half-fabricaat voor het proces, dit zorgt voor een betere hechting met het polymeer en voorkomt ook luchtinluitsels in de matrix door verdamping tijdens het proces
- Een mogelijke verlaging van de materiaaleigenschappen door de omgeving
- Vezelbehandeling voor een verbeterde hechting met de matrix
- Oppervlakte behandeling voor een verhoging van bijv. de vochtbestendigheid
- ...

Vanwege de vele variabelen worden voor een goede optimalisatie van het materiaalgebruik in het product bij voorkeur materiaal karakterisatie testen uitgevoerd. Deze testen worden best uitgevoerd met dezelfde materiaalcombinatie en na een vergelijkbaar productieproces als het uiteindelijke product. [19]

## 5 Tools voor structureel ontwerp

In dit verslag overloopt Hoofdstuk 2 de basis van materiaalselectie, lay-up optimalisatie, falingscriteria, veiligheidsfactoren. Verschillende tools/software zijn ontwikkeld om tot een

goede inschatting en optimalisatie te komen van de laminaatstructuur voor het structureel ontwerp van een product. Deze tools laten toe om de principes uitgelegd in Hoofdstuk 2 op een efficiënte manier uit te voeren en toe te passen.

Dit verslag overloopt twee methodes: laminaat calculators die de principes van klassieke laminaat theorie toepassen op plaatniveau, uitgewerkt voor eLamX<sup>2</sup>, en eindige elementen software waar uitgebreidere en complexere analyses mogelijk zijn.

## 5.1 Laminaat calculators

### 5.1.1 eLamX<sup>2</sup>

eLamX<sup>2</sup> is een OpenSource, Java-geschreven composiet calculator en is ontwikkeld aan de Technische Universiteit Dresden. De software is een laminaat calculator en is geschikt voor plaatberekeningen gebaseerd op de klassieke laminaat theorie. De software is intuïtief en eenvoudig ontworpen zodat een grote theoretische achtergrond niet vereist is bij het gebruik. Modulus die in de software geïmplementeerd zijn voor composietberekeningen zijn:

- Eenvoudige laminaat aanmaak
- Berekening van laminaateigenschappen: ABD-matrix, ingenieursconstanten
- Berekening van hygrothermische effecten
- Berekening van spanning en rek per laag, stabiliteit en vervorming
- Automatische optimalisatie van laminaatopbouw
- Falingsanalyse volgens falingscriteria

Aanvullende modules over micromechanica, niet-lineaire berekeningen, sandwich-structuren en composietplaattrillingen zijn gepland of in ontwikkeling.

De software is gratis beschikbaar op de website van de universiteit. [20]

### 5.1.2 Andere calculators

Naast eLamX<sup>2</sup> bestaan er andere laminaat calculators.

Gratis tools zijn:

- Een internetapplicatie van Efundu:  
[https://www.efunda.com/formulae/solid\\_mechanics/composites/calc\\_ufrp\\_abd\\_layout.cfm](https://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/calc_ufrp_abd_layout.cfm)
- Applicatie van ESP Composites, basis modulus zijn gratis, de geavanceerde zijn betalend: <http://www.espcomposites.com/software/software.html>
- Applicatie via ExcelCalcs:  
<https://www.excelcalcs.com/calcs/repository/strength/plates/laminate-tool.xls/>

Betalende tools zijn :

- Esacomp, meer gebruiksvriendelijk: <http://www.esacomp.com/overview/what-is-esacomp>
- <https://www.anaglyph.co.uk/lap.htm>



## 5.2 Eindige elementen software

Eindige elementen software is een belangrijke tool die gebruikt wordt om het gedrag van structuren en materialen te simuleren en analyseren onder verschillende condities. Om composietberekeningen mogelijk te maken op 3D-structuren, worden deze structuren hierbij in kleinere elementen verdeeld. Een eindige elementen software voert hierbij op elk element en de interacties hiertussen aparte numerieke berekeningen uit volgens de klassieke laminaat theorie. De software neemt deze resultaten samen en geeft zo een inschatting van de structurele respons van het product op de belasting. Bij een goede keuze van elementtype, -aantal en een goede vertaling van de randvoorwaarden geeft het resultaat een goede benadering van de realiteit.

Eindige elementen software is steeds betalend. Voorbeelden van eindige elementen software die structurele composietberekeningen toelaten zijn: Siemens NX, Abaqus, Nastran, Ansys, ...

Eindige elementen software wordt bij composieten structuren ingezet voor volgende doelen:

- Hetzelfde als de laminaat calculators maar dan voor een 3D-structuur en niet enkel op plaatniveau
- Meer gedetailleerde inschatting van de eigenschappen en het gedrag van een afzonderlijke composietlaag, in plaats van de mengregel
- Zowel lineaire als niet-lineaire analyses
- Vermoeiingssimulaties
- Kan gelinkt worden met processimulaties
- Inschatting van trillingsgedrag
- Impactanalyse

Deze eindige elementen simulaties en analyses hebben verschillende voordelen in het ontwerp- en optimalisatieproces. Het nadeel van deze berekeningen is dat ze expertise vragen, kosten meebrengen en de modellering- en berekeningstijd sterk kan oplopen afhankelijk van de complexiteit van de structuur of belasting.

## 6 Conclusie

Hoofdstuk 2 geeft aan dat het ontwerpproces best gestructureerd wordt aangepakt. Een gestructureerd ontwerpproces legt eerst het productdoel en de vereiste specificaties vast, om hierna een gecombineerde materiaal- en proceskeuze te maken. Na de materiaalkeuze kunnen de composieteigenschappen ingeschat worden via mengregels en kan een keuze gemaakt worden in de vereiste vezelstructuur, -oriëntatie. Voor een verdere optimalisatie van de lagenstructuur wordt gebruik gemaakt van veiligheidsfactoren en wordt één of meerdere falingscriteria vastgelegd. De veiligheidsfactor stijgt wanneer de onzekerheid of het gevolg van faling toeneemt. De gekozen waarde ligt typisch tussen 1.2 en 4.0. Een verhoogde onzekerheid in materiaaleigenschappen kan bij biocomposieten zorgen voor een verhoging in de gebruikte veiligheidsfactor. Een manier om de onzekerheid te beperken is om zelf materiaal karakterisatie testen uit te voeren. Dit volgt ook uit Hoofdstuk 4 waarin wordt aangegeven dat de onzekerheid in kwaliteit en materiaaleigenschappen van het startmateriaal een belangrijk verschil is tussen synthetische en biogebaseerde composieten.

Er bestaan drie types falingscriteria: Limiet of niet-interactieve theoriën, interactieve theoriën, deels interactieve / falingsmode afhankelijke theoriën. Het is aangeraden om bij de evaluatie van de belasting uit elke categorie één criteria te gebruiken, vervolgens het verloop van de falingsindex te bekijken, veiligheidsfactoren in te stellen en vervolgens een keuze te maken welk falingscriteria gebruikt wordt naargelang de hoeveelheid conservatisme gewenst is.

Hoofdstuk 3 toont een overzicht van algemene aandachtspunten, beschrijft voor- en nadelen van post-processing vs net-shape production en vermeldt de mogelijke voordelen van een extra oppervlakte laag. Drie typische verbindingstypes worden getoond (mechanische verbindingen, lijmverbindingen, lasverbindingen) en hoe deze verbindingen kunnen worden verwerkt in het productdesign. Verder worden guidelines gegeven om het cruciale ontwerp van de mal bij malprocessen te laten slagen (met aandacht voor de juiste draft angle, scherpe hoeken, oppervlakte textuur en materiaalkeuze van de mal), wordt aangegeven om met gebalanceerde en symmetrische laminaten te werken om koppelingseffecten te vermijden en sluiten vuistregels voor een goede laminaatopbouw hoofdstuk 3 af.

Uit Hoofdstuk 5 volgt dat zowel laminaat calculators zoals eLamX<sup>2</sup> maar ook anderen kunnen gebruikt worden om plaatberekeningen uit te voeren gebaseerd op de klassieke laminaat theorie. Wanneer het nodig is om de lagenstructuur in 3D-structuren te optimaliseren, kan eindige elementen software gebruikt worden. Deze software kan hiernaast ook helpen om een meer gedetailleerde inschatting te geven van de eigenschappen en het gedrag van een afzonderlijke composietlaag, in plaats van de mengregel, en zowel lineaire als niet-lineaire analyses, vermoeiingssimulaties, processimulaties, inschatting van trillingsgedrag en een impactanalyse uit te voeren. Het nadeel van deze berekeningen is dat ze expertise vragen, kosten meebrengen en de modellering- en berekeningstijd sterk kan oplopen afhankelijk van de complexiteit van de structuur of belasting.

## 7 Bijlagen

### 7.1 Lijst productvereisten voor tijdens de designfase

		Value	Flexibility	Comment
<b>1 Introduction</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ This checklist is a document to be discussed jointly by the design office and the client in order to assure that the design office correctly understands the development framework for the part to be designed.</li> <li>■ It is advised to assign attributes to the specifications that indicate whether they are rigid or open for discussion:               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ rigid, not negotiable:</li> <li>■ flexible, open for discussion:</li> <li>■ soft, desirable attribute:</li> </ul> </li> </ul>			rigid flexible soft	
<b>2.1 Description of the part</b>				
■				
<b>2.2 Geometry and weight</b>				
<b>2.2.1 Shape, space envelope</b>				
■ Are the shape and the space envelope of the part already fixed? What are the limits?				
<b>2.2.2 Tolerances</b>				
■ Thickness tolerances?				
■ Shape tolerances?				
■ Tolerances for interface positions (see 2.2.3)				
■ What thermal expansion effects are tolerated? (e.g. resulting mismatch at load points)				
<b>2.2.3 Interfaces</b>				
■ Is the part assembled to other parts?				
■ Is the design of these other parts fixed?				
■ Which materials are used for the other parts?				
■ How are the parts assembled (permanently/temporarily)?				
■ What assembly tolerances have to be respected?				
<b>2.2.4 Weight</b>				
■ What is the target weight?				
■ What is the maximum weight?				
<b>2.3 Environment</b>				
<b>2.3.1 Temperature</b>				
■ Min/max temperature while loaded				
■ Min/max temperature while unloaded				
■ Dynamic temperature cycles?				
■ Do thermal shocks appear?				
<b>2.3.2 Humidity</b>				
■ Is the environment humid?				
<b>2.3.3 Abrasion</b>				
■ Is the environment abrasive? (dust, sand ...)				
<b>2.3.4 Light/UV light</b>				
■ Is the part in the sun? Other light sources?				
<b>2.3.5 Chemical resistance</b>				
■ Is the environment corrosive? (acids, basis, solvents, oxidants, oils ...)				
<b>2.3.6 Electrostatic discharge</b>				
■				
<b>2.3.7 Electromagnetic radiation (EMR)</b>				
■				
<b>2.4 Optical, thermal and electric requirements</b>				
<b>2.4.1 Transparency for light/radiation</b>				
■ Is transparency needed?				
<b>2.4.2 Electrical properties</b>				
■ Electrical conductivity/insulation needed?				
<b>2.4.3 Thermal properties</b>				
■ Thermal conductivity				
<b>2.5 Surfaces</b>				
<b>2.5.1 Surface differentiation</b>				
■ Do all surfaces need the same quality and properties? (1 or 2-sided surface finish)				
<b>2.5.2 Surface type</b>				

■ Does the surface have to be painted?			
■ Is the surface visible			
2.5.3 Surface quality			
■			
<b>2.6 Loads</b>			
2.6.1 Applied external loads			
■ What loads are applied? (magnitude, location, direction)			
■ Are the loads static or dynamic?			
■ Safety factors for loads			
2.6.2 Allowed deflection limits			
■			
2.6.3 Vibration/resonance/damping			
■			
2.6.4 Fretting at load introduction points			
■			
2.6.5 Allowed creep over lifetime			
■			
<b>2.7 Failure and lifetime</b>			
2.7.1 Maximum loads for failure, probability, consequences of failure			
■			
2.7.2 Allowed failure modes			
■ Buckling? Cracking?			
2.7.3 Resistance to impact			
■			
2.7.4 Lifetime			
■ What is the targeted lifetime?			
2.7.5 Maintenance/repair			
■ What repair requirements are expected/accepted?			
<b>2.8 Production and costing</b>			
2.8.1 Production quantity			
■ min, max, basic hypothesis, start and ramp-up rate			
2.8.3 Value for weight saving?			
■ What is the economical benefit of saving 1 kg of weight? (in Euro/kg)			
2.8.4 Modularity			
■ Number of parts similar to this part to design/produce?			
<b>2.9 Quality control and regulations</b>			
2.9.1 Inspection requirements			
■ Non-destructive testing			
2.9.2 Quality assurance and control, materials and process traceability requirements			
■			
2.9.3 Rules and standards, approvals			
■			
2.9.4 Design authority			
■			
2.9.5 Responsibility for the product, warranties			
■			
2.9.6 What regulations apply in case of fire			
■ Resistance to burning			
■ Toxicity of smoke			

## 8 Referenties

- [1] W. Hall and Z. Javanbakht, "Mechanics of Composite Structures: Effect of Fibre Orientation," in *Design and Manufacture of Fibre-Reinforced Composites*, Southport, Springer, 2021, pp. 20-21.
- [2] R. C. Hibbeler, *Statics and mechanics of materials*, 4th edn, Upper Saddle River: Pearson, 2014.
- [3] I. M. Daniel, "Failure of Composite Materials," Blackwell Publishing, Oxford, 2007.
- [4] R. Nijssen, "Hoofdstuk 5 Verbindingen," in *Composieten Basiskennis*, Hogeschool Inholland, 2013, pp. 95-106.
- [5] R. Van de Ven, "Figuur 9.4," in *Composietmaterialen*, Houten, Stam Techniek, 1993, p. 166.
- [6] W. Hall and Z. Javanbakht, "Moulding Composite Parts," in *Design and manufacture of fibre-reinforced composites*, Gold Coast, Springer, 2021, pp. 81-103.
- [7] B. Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Second Edition 2nd Edition, Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2007.
- [8] L. S. M., *Handbook of composite reinforcements*, New York: VCH, 1992.
- [9] J. C. Leslie, "Precision Molding of Advanced Fiber Structures," ASME, Brussels, 1970.
- [10] E. J. Barbero, *Introduction to composite materials design*, composite materials, 3rd edn, Boca Raton : CRC Press, 2017.
- [11] B. T. Astrom, *Manufacturing of polymer composites*, 2nd edn, Routledge: Boca Raton, 2018.
- [12] J. Wanberg, *Composite materials: fabrication handbook #2*, Stillwater, Minnesota: Wolfgang Publications, 2010.
- [13] M. Silcock, C. Garschke, W. Hall and B. L. Fox, "Rapid composite tube manufacture utilizing the Quickstep™ Process," in *J Compos Mater*, Geelong, Journal of Composite Materials, 2007, p. 965–978.
- [14] R. Shenoj and J. F. Wellicome, "Compositematerials in maritime structures," CUP, Cambridge, 1993.
- [15] S. K. Mazumdar, *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*/Sanjay K, Boca Raton: CRC Press, 2002.

- [16] A. Ahmed, B. Tavakol, R. Das, R. Joven, P. Roozbehjavan and B. Minaie, "Study of thermal expansion in carbon fiber-reinforced polymer composites," in *SAMPE international symposium*, 2012.
- [17] F. G, P. S and W. Hall, "External compaction pressure over vacuum-bagged composite parts: effect on the quality of flax fiber/epoxy laminates," *J Compos Mater*, 2018.
- [18] R. Nijssen, "Hoofdstuk 3 Ontwerp van Laminaten," in *Composieten basiskennis*, Hogeschool Inholland, 2013, pp. 57-81.
- [19] M. Jawaid, M. S. Salit and O. Y. Alothman, *Green Biocomposites Design and Applications*, Serdang, Selangor: Springer, 2017.
- [20] A. Hauffe, "ELAMX2," Technische Universitat Dresden, [Online]. Available: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilr/lft/elamx2/elamx>. [Accessed 17 November 2023].
- [21] C. Ageorges, L. Ye and M. Hou, "Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review," in *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Sydney, Elsevier, 2001, pp. 839-857.