



Kennisvergaring en vertaling (State of the Art)

TETRA project C-Bridge

Deze whitepaper werd opgesteld in het kader van het TETRA project C-Bridge en geeft in de eerste plaats een korte kennismaking met composietmaterialen en de mogelijke aandachtspunten bij het gebruik. Verder wordt een state-of-the-art van de composiettoepassingen in structurele applicaties met een nadruk op bruggenbouw weergegeven en wordt deze getoetst aan de Vlaamse context door het in kaart brengen van de composietbruggen in Vlaanderen. Vervolgens wordt een diagnosematrix met betrekking tot de hiaten in de kennis van de leden van de gebruikersgroep opgesteld om de nodige kennis aan te reiken om in eigen beheer een Vlaams composietproject te ontwerpen, te bestellen, te bouwen en/of te evalueren en op te leveren. Als laatste worden representatieve cases vastgelegd die in de loop van de andere werkpakketten terug zullen komen en helpen bij meerdere projectobjectieven.



AANSPRAKELIJKHEID

De Universiteit Gent en degenen die aan dit product hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze publicatie. Toch kan niet worden uitgesloten dat de inhoud onjuistheden bevat. De gebruiker van dit product aanvaardt daarvoor het risico. De Universiteit Gent sluit, mede ten behoeve van de auteurs, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van informatie uit dit product.

TOELATING TOT BRUIKLEEN

De auteurs geven de toelating dit document voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van het document te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit dit document.

VLAAMSE CONTEXT

Aangezien gebruik gemaakt wordt van de Nederlandse CUR-aanbevelingen, kunnen bepaalde begrippen gebruikt in de aanbevelingen anders vertaald worden in dit document om te passen binnen de Vlaamse context.

- Laminatentheorie – Laminaattheorie
- Bruikbaarheidsgrenstoestand – Gebruiksgrenstoestand
- Poisson coëfficiënt – Poisson factor

INHOUDSOPGAVE

1	Kennismaking composieten	3
1.1	Classificatie	3
1.2	Eigenschappen composiet.....	6
1.3	Sandwichpanelen	7
1.4	Productietechnieken	8
1.5	Klassieke laminaattheorie	13
1.6	Sterktecriteria.....	20
1.7	Schadefenomenen.....	22
1.8	Testen van composieten	24
1.9	Vermoeiing	36
1.10	Impactbelasting	38
1.11	Kruip en spanningsrelaxatie	39
1.12	Duurzaamheid	39
1.13	Verbindingen	42
2	Terreinverkenning	47
2.1	State-of-the-art	47
2.2	Composietbruggen in Vlaanderen.....	53
3	Diagnose van de hiaten in de kennis.....	57
4	Representatieve cases.....	59
4.1	Canadabridges, Brugge	59
4.2	Fietsostrade F11, Mortsel.....	60
4.3	Fietsostrade F18, Puurs	60
4.4	Tremelo	60
4.5	Selectie composietbruggen voor trillingsanalyse.....	60
5	Conclusie	61

1 KENNISMAKING COMPOSITIETEN

Een composiet is een materiaalconstructie, bestaande uit minimaal twee macroscopisch nog te onderscheiden materialen die samenwerken om zo tot een beter resultaat te komen. Bij vezelversterkte kunststoffen (VVK) zijn deze materialen een versterkende vezel en een hars dat dienst doet als matrixmateriaal.

De vezels in een composiet zijn bepalend voor de sterkte en stijfheid van het composiet en reduceren de scheuren in het hars, terwijl het hars optreedt als lijm en de vezels bij elkaar houdt. Door het omhullen van een vezel met kunststof kan een vezel ook een hogere drukbelasting opnemen, aangezien deze ondersteund wordt door de kunststof. Een andere belangrijke functie van het hars is dat de vezels beter met elkaar samen kunnen werken, omdat de kunststof belastingen van de ene vezel op de andere kan overdragen door middel van schuifspanningen. Zo worden externe belastingen beter verdeeld over de vezels en wordt de belasting herverdeeld wanneer één lamel bezwijkt. Daarnaast bepaalt de kunststof in hoge mate de gevoeligheid van het composiet voor externe factoren zoals vocht, chemicaliën en ultraviolet licht, en is vaak bepalend voor kleur en oppervlaktekwaliteit, lichtdoorlatendheid en brandveiligheid.

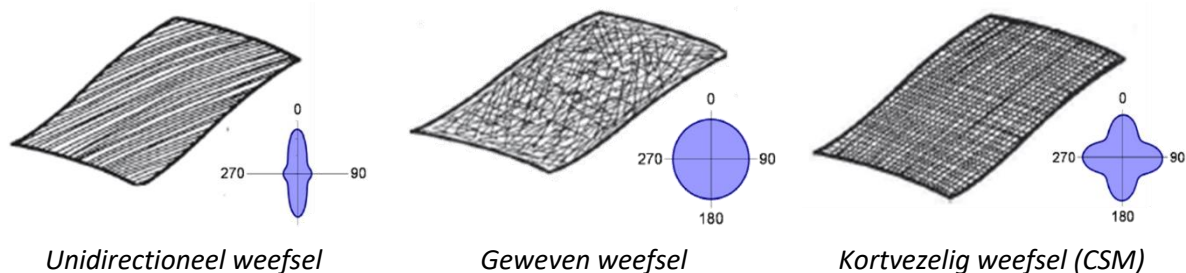
Zoals elk materiaal hebben ook composieten enkele voor- en nadelen. In de volgende tabel worden de belangrijkste voor- en nadelen van composieten in de bruggenbouw weergegeven.

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewichtsbesparend ▪ Lage onderhoudskosten ▪ Grote vrijheid in vorm, materiaal en productietechnieken ▪ Hoge mate van integratie van functies mogelijk ▪ Sterkte, stijfheid, thermische en elektrische weerstand kunnen gemanipuleerd worden ▪ Gebruik van duurzame materialen mogelijk ▪ Automatisering mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoge materiaalkosten (koolstofvezels en epoxyharsen) ▪ Rekenmethode soms specialistisch ▪ Gedrag van details en verbindingen relatief onbekend ▪ Nabewerking nog niet ver ontwikkeld ▪ Stijfheid en faalgedrag kunnen ongunstig zijn ▪ Gevoelig voor temperatuur, brand en blikseminslag ▪ Recycling nog niet ver ontwikkeld

1.1 Classificatie

Composieten kunnen geclassificeerd worden aan de hand van de het type hars, vezels, vezelconstructie en als sandwichconstructie. Op pagina 6 zijn de verschillende materialen die gebruikt kunnen worden voor de vervaardiging van composieten weergegeven aan de hand van deze classificatie. Naast het gebruik van synthetische harsen bestaat ook de mogelijkheid biologische harsen en vezels toe te passen.

Onder de vezelconfiguraties zijn drie weefsels mogelijk. In de eerste plaats zijn er unidirectionele (UD) weefsels waarbij het overgrote deel van de vezels in één bepaalde richting lopen en slechts enkele vezels transversaal zijn aangebracht om de vezels bij elkaar te houden tijdens het productieproces. In het tweede type worden de vezels door schering en inslag verwerkt tot een geweven weefsel, waarbij verschillende percentages aan vezels in de verschillende richtingen mogelijk zijn. Hieronder bestaan verschillende opbouwen zoals bi- tri- en quaddirectioneel waarbij de vezels respectievelijk in twee, drie en vier hoofdrichtingen (0°, 90°, 45° en -45°) zijn aangebracht. In het laatste geval spreekt men ook over een quasi-isotroop weefsel aangezien de vezels in de vier hoofdrichtingen aangebracht zijn en deze daardoor een bijna isotroop gedrag vertonen. Indien het weefsel een 0°- en 90°-laag bevat, spreekt men ook over een square weefsel. Als laatste kunnen de weefsels ook bestaan uit willekeurig gebonden korte vezels, in dit geval spreekt men van een kortvezelig weefsel (CSM).

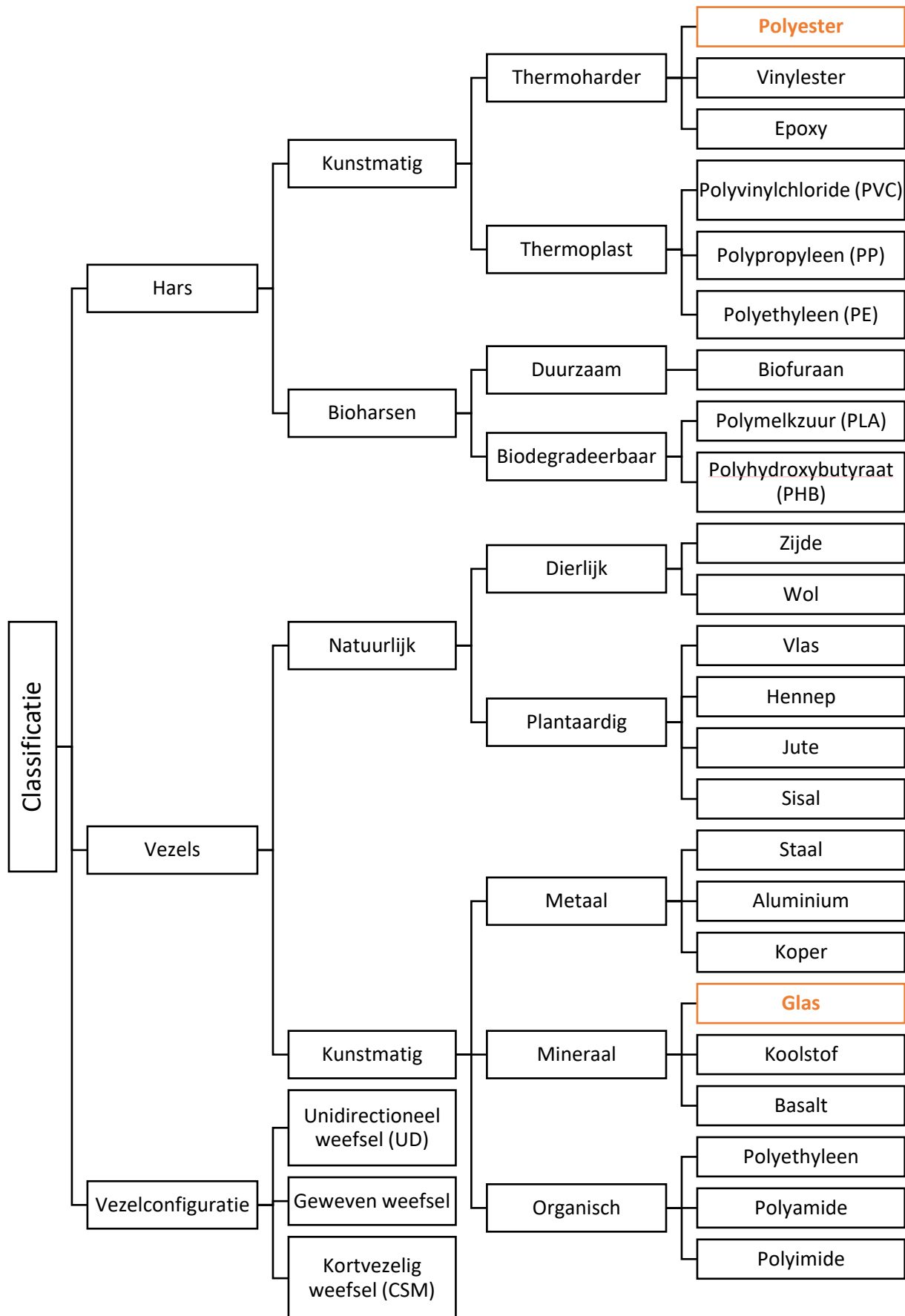


Sizing

Bij het vervaardigen van vezelmateriaal wordt uiteindelijk een dunne film om de vezel aangebracht, met daarin chemicaliën die er onder andere voor zorgen dat de vezel goed aan het hars hecht. Het is de interface tussen vezel en hars. Deze zal ca. 0,5% van het vezelgewicht uitmaken. Omdat verschillende harsen een verschillende chemische samenstelling hebben, wordt deze sizing aangepast aan een specifieke hars. Een goede hechting van vezel en hars is ontzettend belangrijk voor de eigenschappen van een composiet. Naast de verschillende vezelconfiguraties van de vezelmateriaal (weefsel, mat, etc.) moet bij de keuze van een versterkingsproduct en hars ook opgelet worden of de twee goed aan elkaar hechten.

Voor bouwkundige toepassingen wordt voornamelijk gebruik gemaakt van synthetische thermohardende kunststoffen aangezien deze een lage kostprijs, grote duurzaamheid en een goede stabiliteit op het vlak van kruip vertonen. Epoxy wordt enkel gebruikt als de mechanische eigenschappen van de structuur van groot belang zijn en als gebruik wordt gemaakt van vezels met hoge stijfheden zoals koolstofvezels. Voor de vezels wordt in de bouwsector voornamelijk gebruik gemaakt van glasvezels aangezien deze een lage kostprijs en grote duurzaamheid hebben. Wat de vezelconfiguratie betreft gaat de voorkeur in de bouwsector uit naar een stapeling van UD-weefsels eerder dan geweven weefsels. Een dergelijke stapeling wordt benoemd als een laminaat.

Vaak worden vezelversterkte kunststoffen gebruikt in een sandwichconstructie waar deze deel uitmaken van de boven- en onderflens, gescheiden door een kernmateriaal om een buigstijf geheel te bekomen. Hierbij dienen de flenzen sterk en stijf te zijn, terwijl de kern flexibel en laag in gewicht dient te zijn. Het kernmateriaal moet aan een zekere afschuif- en lokale drukkracht kunnen weerstaan.



1.2 Eigenschappen composiet

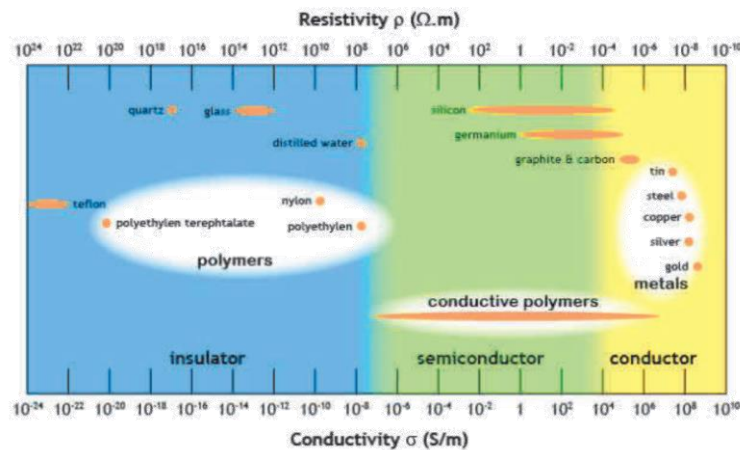
De eigenschappen van vezelversterkte composietmaterialen kunnen verdeeld worden in twee grote categorieën.

▪ Fysische eigenschappen

- De dichtheid van een composietmateriaal kan bepaald worden aan de hand van de dichtheden ρ_f en ρ_m van de vezels en het hars en de vezelvolumefractie V_f zoals weergegeven is in volgende formule.

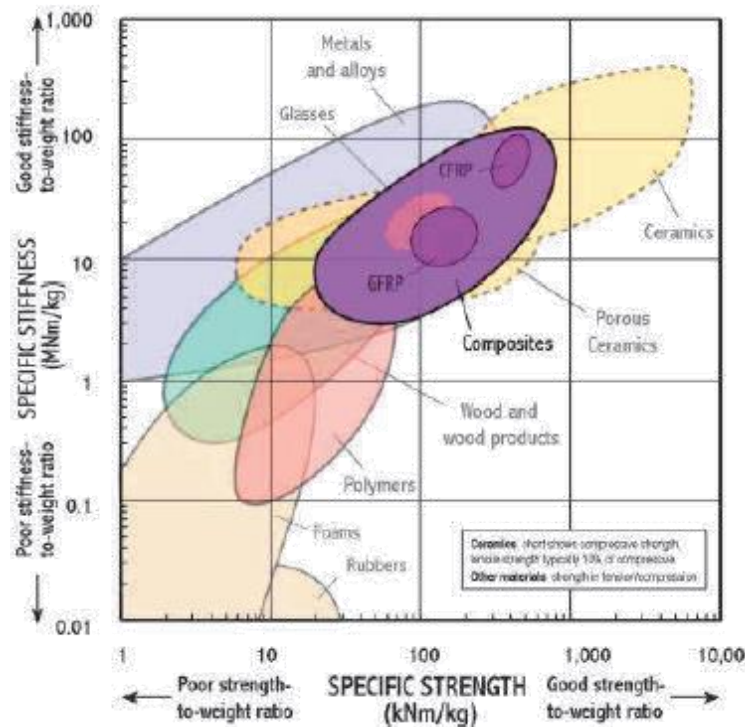
$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f)$$

- De glastransitietemperatuur is de temperatuur waarbij een amorfe vaste stof zoals een polymeer bros wordt bij koeling, of zacht bij verwarming. Deze is voornamelijk belangrijk bij de verwerking van 'prepreg' weefsels in een autoclaaf en bij het beoordelen van de omgevingscondities en vermoeiing van composieten met thermohardende polymeren.
- De smelttemperatuur is het temperatuursbereik waar de fase van de stof overgaat van vast naar vloeibaar bij opwarmen of van vloeibaar naar vast bij afkoelen. Deze grens is belangrijk bij het verwerken van thermoplastische polymeren.
- Thermische uitzettingscoëfficiënt: een VVK kent een verschillende uitzetting in de verschillende richtingen afhankelijk van de opbouw van het laminaat. Dit kan leiden tot restspanningen tijdens het uitharden van een composieten element wanneer dit geproduceerd wordt door middel van een autoclaaf of relevant zijn bij temperatuursbelastingen.
- Elektrische eigenschappen: afhankelijk van de combinatie van gebruikte vezels en harsen kunnen composieten van zeer slecht tot zeer goed geleidend geproduceerd worden. In beide gevallen zijn verschillende toepassingen mogelijk.



▪ Mechanische eigenschappen

- Stijfheid en sterkte worden bepaald aan de hand van formules die het volumepercentage aan vezels in rekening brengen.

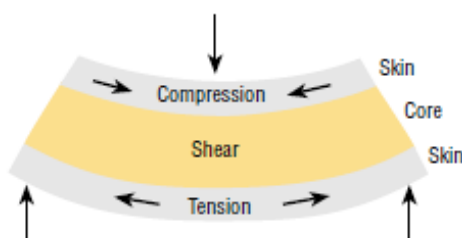


1.3 Sandwichpanelen

Een sandwichmateriaal is een constructie die bestaat uit een boven- en een onderlaag van relatief stijf en sterk materiaal, die op afstand van elkaar gefixeerd worden door een tussenlaag, die doorgaans minder sterk en stijf is en in ieder geval zeer licht is. Vaak wordt schuim gebruikt als kernmateriaal, maar ook balsahout wordt veel toegepast. In de luchtvaarttechnologie wordt veel gebruik gemaakt van een honingraatstructuur als kernmateriaal. Als materiaal voor de boven- en onderlagen, simpelweg de huiden, wordt uitgegaan van composieten laminaten, maar in principe valt elke combinatie van huid en kern onder de definitie ‘sandwich’.

Een sandwichconstructie is in veel gevallen analoog aan de vaak gebruikte ‘I-balk’ (of H-profiel), waarbij de flenzen de grootste bijdrage aan het traagheidsmoment leveren en daardoor de meeste normaalspanningen opnemen en de lijfplaat de schuifspanningen. Over het algemeen zijn de functies van huid- en kernmateriaal als volgt verdeeld:

- Huiden
 - zorgen voor de stijfheid en sterkte in het vlak van het laminaat en nemen de belangrijkste normaalspanningen op;
 - nemen contactkrachten op en dienen als bevestigingselement.
- Kern
 - houdt de huiden op afstand, zodat ze hun constructieve functie goed kunnen vervullen;
 - vangt de meeste schuifspanningen als gevolg van bijv. dwarskrachten op;
 - ondersteunt de huiden tegen bijv. knik.



Relative weight	1	1.03	1.06
Relative bending stiffness	1	7	37
Relative bending strength	1	3.5	9.2

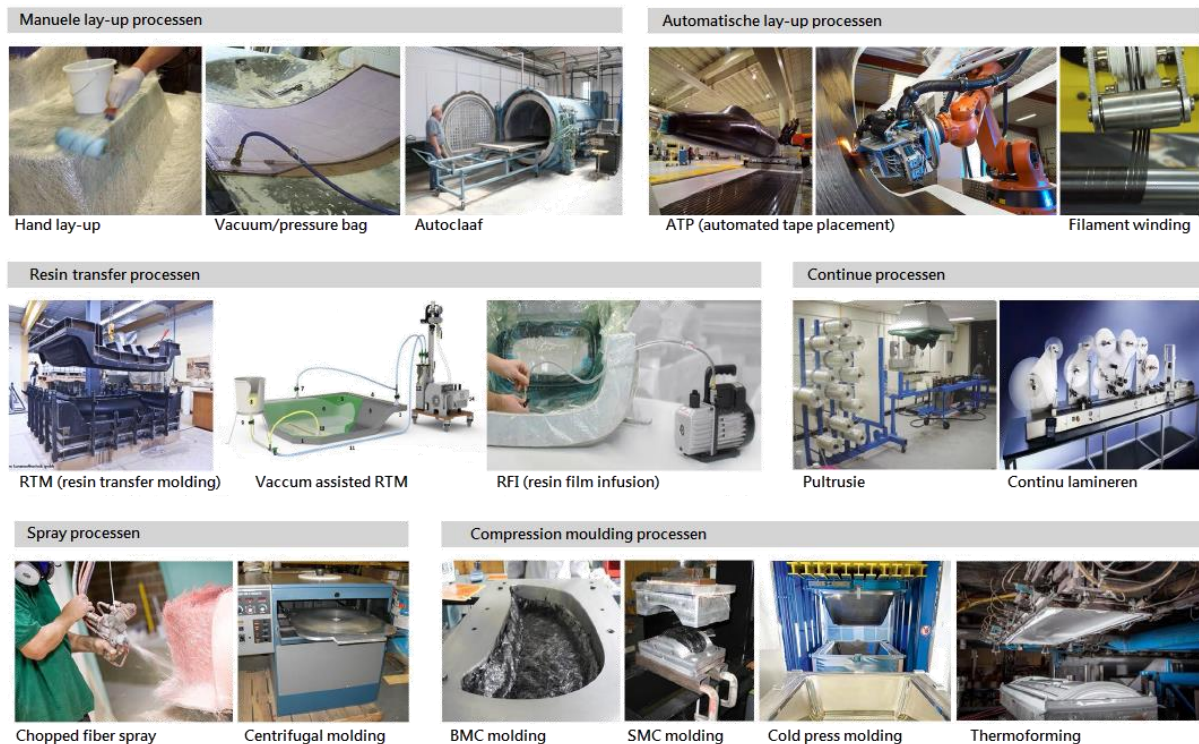
Zoals vermeld zijn sandwichpanelen zeer geschikt als constructieve elementen die drukbelastingen in het vlak kunnen opnemen. Het berekenen van de knikweerstand wordt hier buiten beschouwing gelaten, maar hangt af van de randvoorwaarden (manier van inklemmen), de stijfheden van de huiden en kern en de weerstand tegen buiging. Hier wordt wel vermeld dat de aard van een sandwichconstructie wel leidt tot een veelheid aan mogelijke faalwijzen onder een knikbelasting. Enkele zijn beschreven in onderstaande figuur.



Een paneel kan elastisch uitknikken (links in de bovenstaande figuur), maar er kan ook schade ontstaan in de verbinding tussen huid en kern, waardoor de knikweerstand van de huid afzonderlijk wordt aangesproken, en die is veel lager dan de knikweerstand van de sandwich (linksonder). Knik van één van de huiden kan ook leiden tot uiteenscheuren van de kern (naar buiten uitknikkende huid) of indrukkingsschade van de kern (naar binnen knikkende huid). Bij een hongiingraatkern kan de huid lokaal tussen de wanden van de hongiingraat knikken. Dit wordt dimpling genoemd.

1.4 Productietechnieken

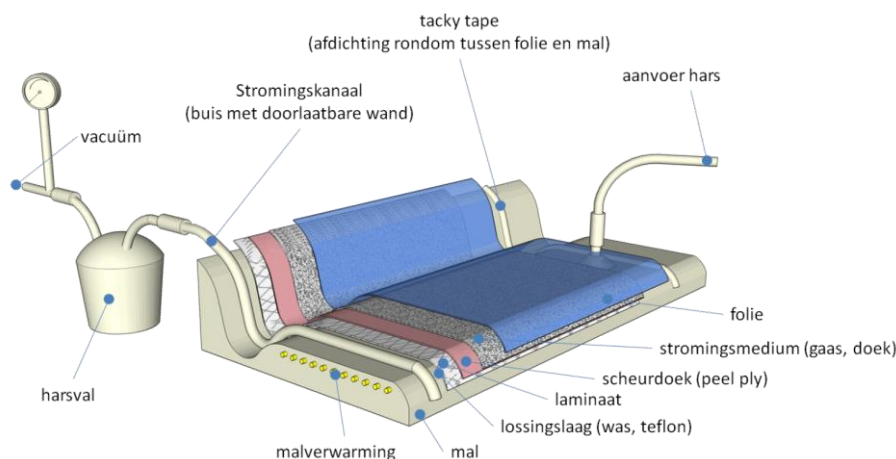
Hieronder kan een afbeelding teruggevonden worden van de verschillende productietechnieken die mogelijk zijn voor composietelementen.



Voor bouwkundige toepassingen worden vaak enkele van de hierna besproken technieken toegepast.

1.4.1 Vacuum-assisted resin transfer moulding

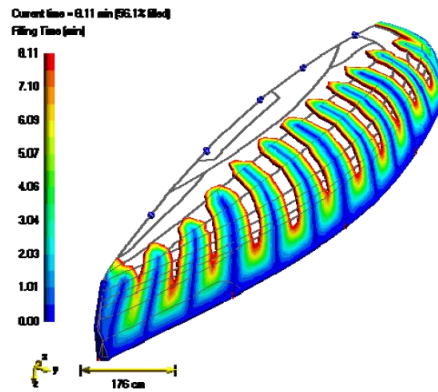
Vacuum-assisted resin transfer moulding, kortweg VARTM of vaak ook vacuüminfusie genoemd, maakt gebruik van een negatieve harde ondermal voor het vormen van het element en een flexibele bovenmal. In de ondermal worden de lamellen met verschillende vezeloriëntatie geplaatst. In geval van een sandwichstructuur vormen deze lamellen de onderflens, en wordt hierop het kernmateriaal geplaatst, bijv. een schuim of balsahout. Daarop worden nogmaals verschillende lamellen geplaatst als bovenflens. Hierboven wordt een scheurdoek en stromingsmedium geplaatst, welke respectievelijk zorgen voor het gemakkelijk verwijderen van het stromingsmedium en het goed verdelen van het hars over de lamellen. Ten slotte wordt een bovenste folie bevestigd dat een luchtdicht geheel vormt met de onderste folie, en komt hierop de bovenmal. Dit luchtdichte volume wordt vacuüm getrokken via afzuigpunten, waardoor tegelijkertijd een hars wordt aangezogen op verschillende harstoevoerpunten zodat de lamellen gedrenkt worden in hars, dat aansluitend kan uitharden. Bij de productie is het zeer belangrijk dat de afdichting tussen de ondermal en de flexibele bovenmal volledig luchtdicht gebeurt zodat tijdens de productie geen lucht in het composiet kan worden getrokken, wat zou kunnen leiden tot defecten in het eindproduct. Ingesloten luchtballen in het hars dienen om deze reden ook verwijderd te worden vóór deze geïnfuseerd kan worden in het vezelpakket. De infusie van het hars gebeurt met behulp van atmosferische druk.



Bij de infusie van met name grote producten moet men goed nadenken over de aansluitpunten van de harstoevoer en de luchtafvoer op het product. Deze bepalen in grote mate de infusiestrategie. Wanneer men een verkeerde infusiestrategie toepast kunnen de volgende twee meest voorkomende problemen optreden:

- Onvolledige infusie door te lang infusiepad: tijdens de infusie wordt het hars stroperiger, waardoor het steeds minder snel door het product stroomt; wanneer men te lange infusiepaden (afstand tussen aanvoer en afvoerpunten) gebruikt zal het hars niet overal in het product kunnen komen.
- Onvolledige infusie door onjuist voorkeurspad: het hars zoekt tussen aanvoer en afvoer de weg van de minste weerstand. Bij een vezelpakket (minder goed doorlaatbaar voor hars) waarop over het gehele infusiepad doorstroommedium ligt (goed doorlaatbaar voor hars), zal het hars de voorkeur hebben om door het doorstroommedium te vloeien in plaats van door het vezelpakket. Dit is bijvoorbeeld ook het geval wanneer harstoevoerleidingen (runners) te ver in de opstelling doorlopen; dan kan 'racetracking' optreden, waarbij droge plekken midden tussen de aanvoerleidingen ontstaan.

Er bestaat software, die gebaseerd is op een combinatie van de eindige-elementenmethode en de wet van Darcy (zie kader), waarmee men de gevolgen van de infusiestrategie kan nagaan. Aan de hand van de voorspelde infusietijd kan men ook de productietijd afschatten en eventueel verbeteren.



Wet van Darcy

Om de infusie van composieten beter te begrijpen en bijvoorbeeld de 'infusiestrategie' te kunnen bepalen, is kennis van de viscositeit van de niet-uitgeharde matrixmaterialen van belang, evenals kennis van de permeabiliteit van het versterkingsmateriaal. Aan de berekening van een infusie ligt de wet van Darcy ten grondslag, die luidt:

$$Q = \frac{K \cdot \Delta p}{\mu \cdot \Delta x}$$

Met:

Q	Volumestroom [m ³ /s]
K	Permeabiliteit van het medium [m ²]
μ	Viscositeit van het hars [Pa·s]
Δp	Drukverschil [Pa]
Δx	Lengte-eenheid [m]

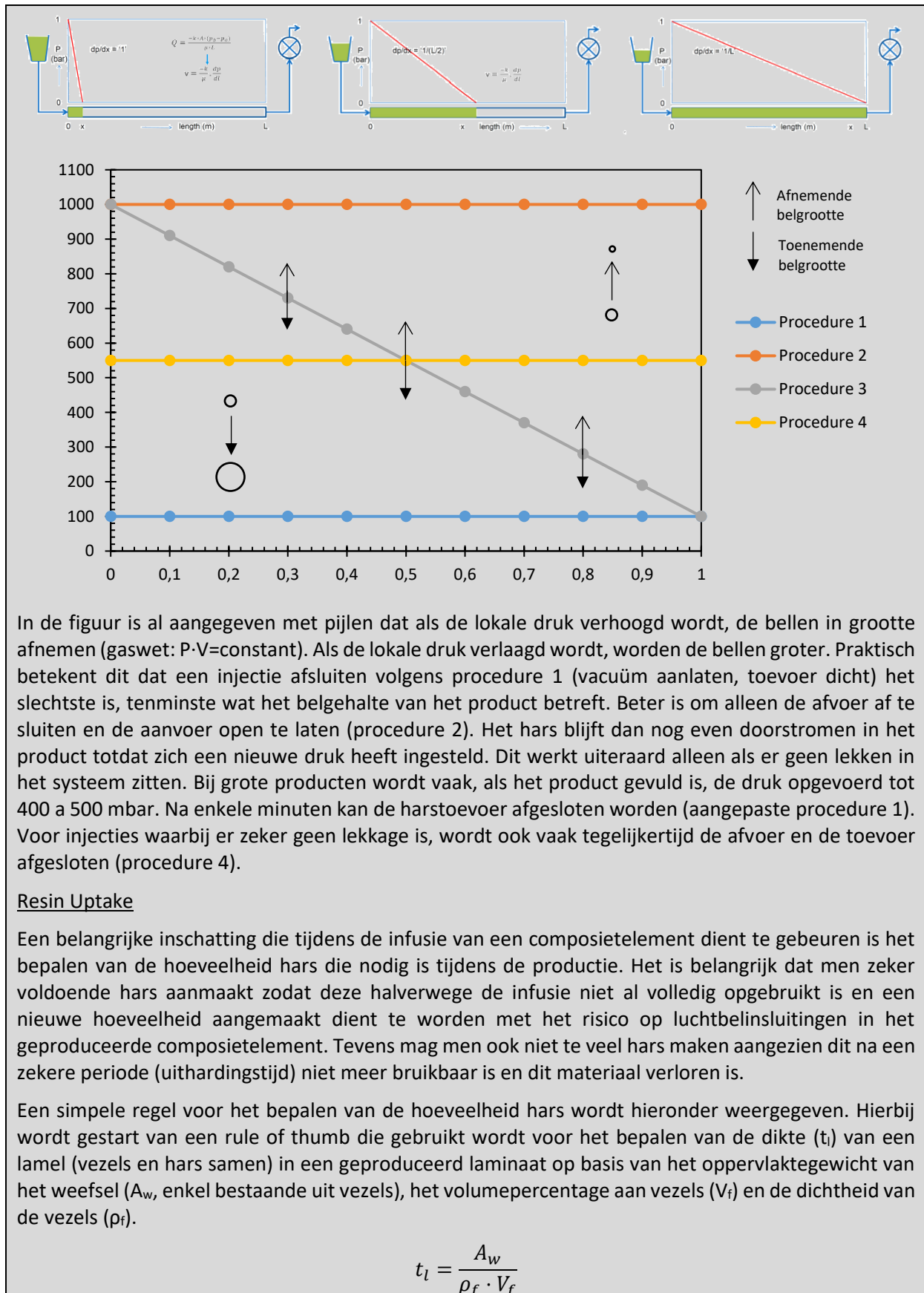
De formule zegt dat hoe lager de viscositeit en hoe hoger de druk en de permeabiliteit, des te groter is het volume dat door een bepaalde doorsnede A van een medium kan stromen, en des te korter is de infusietijd.

Bij thermoharders geldt dat hoe hoger de temperatuur, des te sneller de uitharding (dus de toename in viscositeit). Dit wordt soms gecompliceerd, doordat de uitharding van thermoharders een exotherme reactie is, waarbij warmte vrijkomt. Als deze warmte slechts in beperkte mate afgevoerd kan worden (bijv. door het omliggende laminaat, een isolerende mal, bij sandwichmaterialen), zal de temperatuur stijgen en de uitharding versnellen, waardoor de temperatuur verder stijgt. Dit is een zichzelf versterkend proces.

Tijdens het infusieproces spelen tevens de beëindigingsprocedures een grote rol in de grootte van de luchtbelinsluitingen in het uitgeharde laminaat. De injectie kan op vier verschillende manieren beëindigd worden:

1. Laat afzuigpunten open, sluit harstoevoer af
2. Sluit afzuigpunten af, laat harstoevoer open
3. Laat afzuigpunten en harstoevoer open
4. Sluit afzuigpunten en harstoevoer af

Het grote verschil tussen al deze beëindigingsprocedures is de drukverdeling die in het product ontstaat. De drukverdeling die in de volgende figuur bij procedure 3 staat, komt ook overeen met de drukverdeling in het product op het moment dat het product helemaal gevuld is.



De lamel wordt theoretisch opgedeeld in een laag die enkel uit vezels bestaat en een laag die enkel uit het matrixmateriaal (hars) bestaat. De theoretische dikte (t_l) van de vezels in deze lamel wordt als volgt berekend.

$$t_f = V_f \cdot t_l = \frac{A_w}{\rho_f}$$

De theoretische dikte van het matrixmateriaal (t_m) in deze lamel is het verschil tussen de dikte van de lamel en de theoretische dikte van de vezels.

$$t_m = t_l - t_f$$

Aan de hand van deze theoretische dikte van de matrix kan dan de resin uptake (RUT_l) per eenheid van oppervlakte van één lamel berekend worden door deze te vermenigvuldigen met de dichtheid van de matrix (ρ_m).

$$RUT_l = t_m \cdot \rho_m$$

Om de totale resin uptake (RUT_{tot}) van het volledige laminaat te berekenen wordt de resin uptake van één lamel vermenigvuldigd met de totale oppervlakte (A) van alle lamellen samen. Deze waarde wordt vergroot met 20% om rekening te houden met de verliezen die optreden in de leidingen, distributiemesh, breather, ...

$$RUT_{tot} = 1,2 \cdot A \cdot RUT_l$$

Tevens kan een resin uptake factor bepaald worden, die enkel afhankelijk is van de dichtheden van de vezels en de matrix en het vezelvolumepercentage.

$$RUF = \frac{\rho_m \cdot (1 - V_f)}{\rho_f \cdot V_f}$$

In bovenstaande formule wordt het volume aan luchtinsluitingen (V_l) in het laminaat verwaarloosd zodat $V_l = 0$. Door de resin uptake factor te vermenigvuldigen met het oppervlaktegewicht van het weefsel kan tevens de resin uptake van een lamel berekend worden.

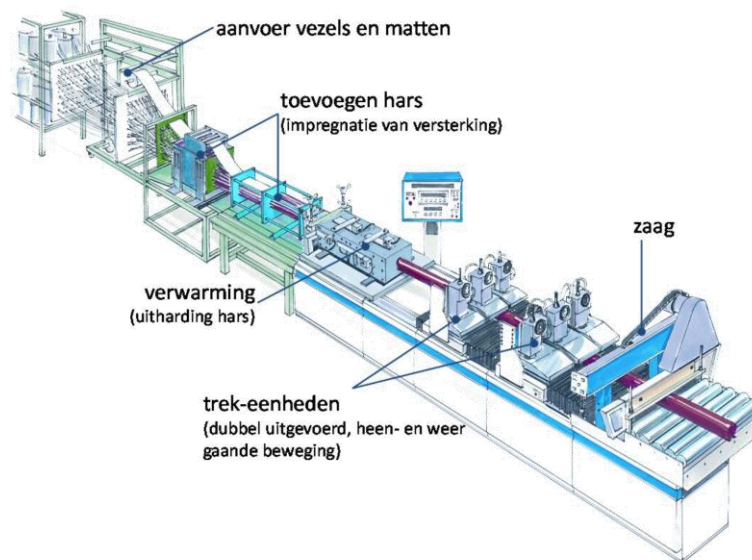
$$RUT_l = RUF \cdot A_w$$

Hieronder kunnen waarden voor de resin uptake factor teruggevonden worden voor E-Glass/Epoxy en E-Glass/Polyester voor verschillende vezelvolumepercentages.

Vezel/Hars combinatie	Vezelvolumepercent [%]				
	45	50	55	60	65
E-Glass/Epoxy	0.594	0.486	0.398	0.324	0.262
E-Glass/Polyester	0.571	0.467	0.382	0.311	0.251

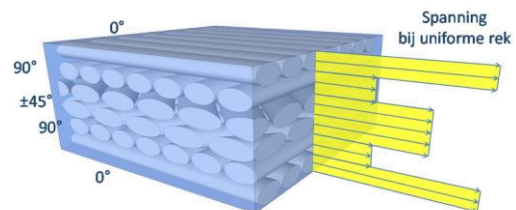
1.4.2 Pultrusie

Tijdens het pultrusieproductieproces worden alle vezels en matten door een mal getrokken terwijl het hars in de mal wordt toegevoegd. Door de productiewijze is de overgrote hoeveelheid van de vezels volgens de langsrichting van het element georiënteerd. Het profiel wordt uitgehard bij hogere temperaturen (ca 130°C) en meestal op een bepaalde standaardlengte afgezaagd. Het verschil van deze productiemethode ten opzichte van vacuüminfusie is dat pultrusie volledig geautomatiseerd kan verlopen. Het nadeel is dan weer dat er geen of slechts weinig vrijheid is in de vorm van de bekomen elementen, de breedte die beperkt is tot de afmetingen van de installatie en de grote mate van orthotropie, waardoor de weerstand tegen geconcentreerde belastingen beperkt is.

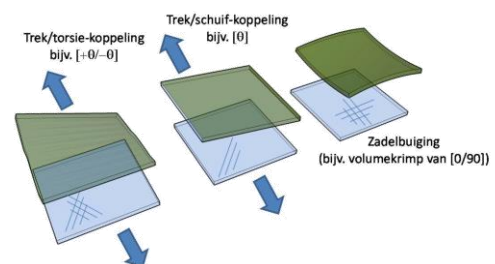


1.5 Klassieke laminaattheorie

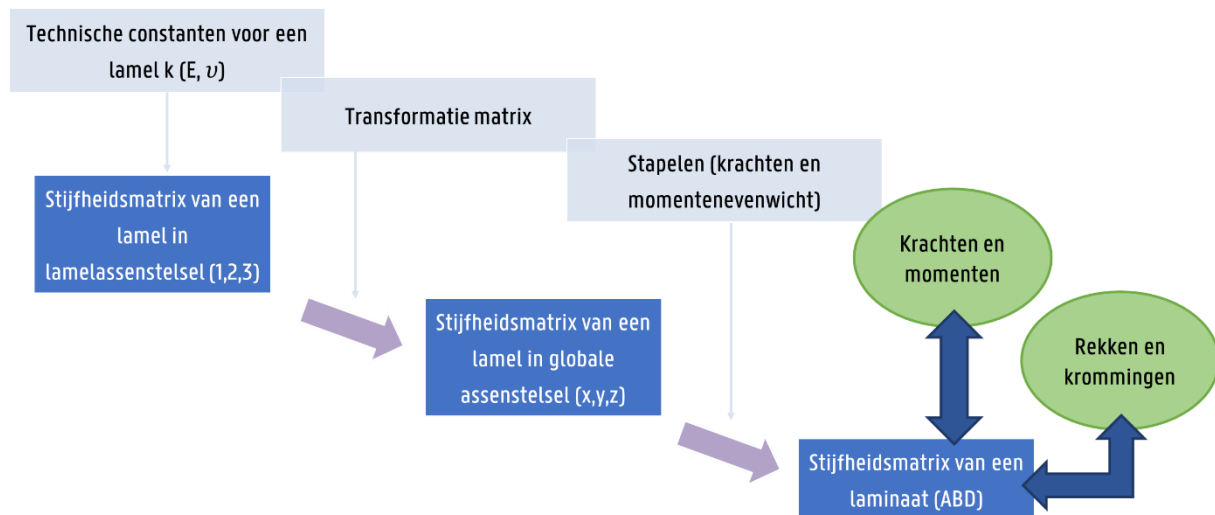
Een laminaat wordt opgebouwd uit verschillende lamellen, die ieder hun eigen eigenschappen hebben. Voor laminaten met lamellen die alle gelijk zijn en in dezelfde richting liggen zijn de laminaateigenschappen (de relatie tussen uitwendige belasting/spanning en rek) eenvoudig af te leiden. Maar wanneer lamellen in verschillende richtingen gestapeld worden, verschilt de stijfheid in één bepaalde laminaatrichting per lamel. Een uitwendige belasting heeft dan verschillende inwendige lamelspanningen tot gevolg. Een slappe lamel zal immers net zoveel rekken als een stijve omdat de lamellen op elkaar vastzitten, maar door het verschil in elasticiteitsmodulus ontstaan in de slappe lamel geringere spanningen.



Dit heeft als belangrijk gevolg dat, wanneer men de sterkte van een laminaat wil bepalen, de spanningen per lamel moeten uitgerekend worden aan de hand van de rekken en getoetst worden aan een faalcriterium. Daarnaast kunnen koppelingseffecten optreden, bijvoorbeeld wanneer de lamelstijfheden niet symmetrisch ten opzichte van het midden van het laminaat liggen.



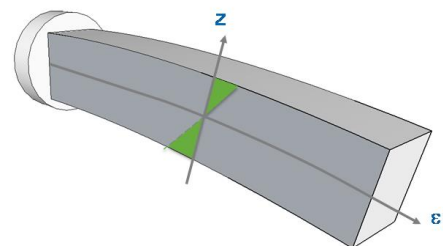
Het bepalen van de stijfheid en sterkte van de constructie is bij gebruik van composietmaterialen anders dan bij isotrope materialen. Dit geldt zelfs als men quasi-isotrope laminaten in de constructie verwerkt, omdat men met gelaagde constructies werkt. Hieronder is het stroomschema weergegeven van de klassieke laminaattheorie (KLT), die voor deze berekening gehanteerd wordt.



Allereerst wordt per lamel bepaald wat de ‘technische constanten’ zijn. Dit zijn de waarden van de elasticiteitsmodulus en Poisson-factor in elke richting van de lamel. Vervolgens wordt de stijfheidsmatrix en/of de compliantiematrix van elke lamel bepaald in de hoofdrichtingen (bijv. vezelrichting en loodrecht daarop) van de lamel. Deze matrix legt het verband tussen spanning en rek en bevat de technische constanten.

Omdat een lamel in een willekeurige richting in een laminaat verwerkt kan worden, is de hoofdrichting van de lamel niet altijd evenwijdig aan de hoofdrichting van het laminaat. De lamel wordt dus ‘gedraaid’ in het laminaatvlak aangebracht. De eigenschappen van de lamel in de laminaathoofdrichting moeten bepaald worden, wat gebeurt met behulp van de transformatiematrix (rotatiematrix).

Wanneer de lamellen gestapeld worden, zijn de spanningen in elke lamel nu te berekenen als functie van de externe belasting en een combinatie van de (getransformeerde) lameleigenschappen, tenminste, als de externe belasting een normaalbelasting evenwijdig aan het vlak van het laminaat is. Hiervoor wordt de stijfheidsmatrix van het laminaat bepaald uit de stijfheidsmatrices van de lamellen. Om ook de respons bij een buigend moment te kunnen berekenen moet een kromming van de plaat geïntroduceerd worden. Deze kromming wordt vertaald naar de rekken van de lamellen: lamellen die verder van de neutrale lijn liggen, rekken méér dan lamellen die er dichtbij liggen.



De matrix die de relatie tussen externe normaal- en momentbelastingen enerzijds en de rekken en krommingen in het laminaat anderzijds weergeeft, wordt de ABD-matrix genoemd.

- De A-matrix beschrijft de rekken ϵ in het vlak van het laminaat als gevolg van normaalbelastingen N (en omgekeerd);
- De B-matrix beschrijft de koppelingseffecten tussen de rekken in het vlak als gevolg van buigend momenten M en de krommingen κ als gevolg van de normaalbelastingen;
- De D-matrix beschrijft de relatie tussen krommingen en buigende momenten.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{Bmatrix}$$

1.5.1 Aannames

De volgende aannames worden gemaakt in de KLT:

- Uitgesmeerde eigenschappen: de structuur van de vezels en het hars wordt niet gemodelleerd. Voor elke lamel wordt gebruik gemaakt van 'uitgesmeerde' eigenschappen. Men kan de theorie dus niet gebruiken om te bepalen wat er op microscopisch niveau binnen een lamel gebeurt. Hierbij wordt er ook van uitgegaan dat het vezelgehalte constant is;
- De theorie is lineair elastisch: eventueel niet-lineair gedrag van de deelnemende lamellen wordt niet verdisconteerd;
- De lamellen worden als een orthotroop materiaal beschouwd, wat wil zeggen dat elke laag van het composiet drie symmetrievlakken bezit die gelegen zijn volgens de hoofd orthotrope richtingen;
- Het laminaat heeft een constante dikte: in de buurt van ply-drops of andere diktesprongen is de theorie niet geldig;
- De wet van Hooke wordt uitgedrukt volgens het lokale assenstelsel $[e_1, e_2, e_3]$ welke de hoofd orthotrope richtingen zijn;
- Een lamel wordt beschouwd als een transversaal anisotroop materiaal. Dit wil zeggen dat in één van de symmetrievlakken de elastische eigenschappen (elasticiteitsmodulus E , glijdingsmodulus G en Poisson-factor ν) niet richtingsafhankelijk zijn. Hieruit volgt dat:

$$\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{\nu_{21}}{E_{22}} \quad E_{22} = E_{33} \quad \nu_{12} = \nu_{13} \quad \nu_{23} = \nu_{32} \quad G_{23} = \frac{E_{22}}{2 \cdot (1 + \nu_{23})}$$

Hierdoor kan het aantal onafhankelijke onbekenden voor een lamel gereduceerd worden tot vijf, namelijk E_{11} , E_{22} , G_{12} , ν_{12} en ν_{23} ;

- In vele gevallen gaat het om dunne componenten waardoor de spanningen uit het vlak kunnen verwaarloosd worden.

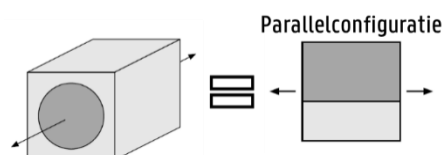
$$\tau_{13} = \tau_{23} = \sigma_{33} = 0$$

Het aantal onafhankelijke onbekenden wordt hierdoor nog verder gereduceerd tot vier, namelijk E_{11} , E_{22} , G_{12} en ν_{12} .

1.5.2 Technische constanten van een lamel

Een eerste stap in de bepaling van de eigenschappen van een lamel of laminaat is het bepalen van de stijfheid op grond van de gebruikte vezels en het hars en de verhouding van de eigenschappen van die twee. Hiervoor worden de 'mengwetten' (rules of mixture) gebruikt, waarin men het vezelvolumegehalte en de vezel- en matrixstijfheden invult, en waar de stijfheden van de lamel in de verschillende hoofdrichtingen uitkomen. Deze mengwetten gaan uit van een goede hechting tussen vezels en matrix en afwezigheid van schade en insluitels.

Voor een afschatting van de longitudinale stijfheid (dus in de vezelrichting) wordt het parallelmodel gebruikt. Hierbij is een composiet geschematiseerd als een 'blokje' vezelmateriaal naast een blokje harsmateriaal.

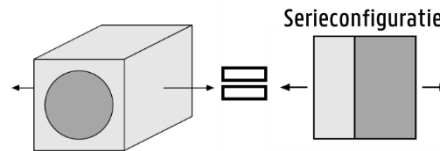


In deze configuratie zijn de rekken voor zowel de vezels (subscript 'f'), de matrix (subscript 'm') en het composiet ('c') gelijk.

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c}$$

$$E_c = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m$$

Het eenvoudigste model waarmee de transversale stijfheid bepaald kan worden is het seriemodel.



In dit model geldt dat de spanningen gelijk moeten zijn:

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{\sigma_f} + \frac{1 - V_f}{\sigma_m}$$

Het seriemodel vertoont nogal wat afwijkingen met de realiteit. Hier zijn tal van verbeterde modellen voor ontwikkeld, zoals de methode van Halpin-Tsai. Het uitvoeren van experimenten geeft meestal een nauwkeuriger beeld van de stijfheidseigenschappen van een specifiek materiaal.

1.5.3 Stijfheidsmatrix van een lamel

De relatie tussen spanning en rek wordt de constitutieve relatie genoemd. Voor een ééndimensionale staaf is deze eenvoudig en gelijk aan de wet van Hooke. De constitutieve vergelijking van een orthotrope lamel ziet er uit als volgt:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [C] \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

Hierbij is de complantiematrix [C] uitgeschreven. Men kan hetzelfde ook schrijven met de spanning als functie van de rek. Hiervoor inverteert men de complantiematrix naar de stijfheidsmatrix [E].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} E_1 & \frac{\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} E_2 & 0 \\ \frac{\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} E_2 & \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [E] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

1.5.4 Transformatiematrix

Van de transformatiematrix bestaan twee varianten: die voor de spanningen en die voor de rekken. Al naargelang de constitutieve vergelijkingen van een lamel in termen van de stijfheidsmatrix of complantiematrix geschreven zijn, gebruikt men de ene of de andere vorm.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]_{\sigma} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Hierin is $c = \cos \theta$ en $s = \sin \theta$. Met bovenstaande vergelijking worden de spanningen in de hoofdrichting van de lamel berekend als functie van de draaiing in het vlak van het laminaat ter grootte van θ . Dezelfde redenering kan gevolgd worden voor de rekken:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -2sc & 2sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]_{\varepsilon} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Met voorgaande formules kan voor één lamel, onder een willekeurige hoek ten opzichte van de laminaatspanningsrichtingen (in het globale laminaat-assenstelsel), het verband tussen spanningen en

rekken gegeven worden middels de transformatiematrices te draaien, zodat men de constitutieve vergelijking van diezelfde lamel in een globaal assenstelsel krijgt:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1}[E][T] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{E}] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

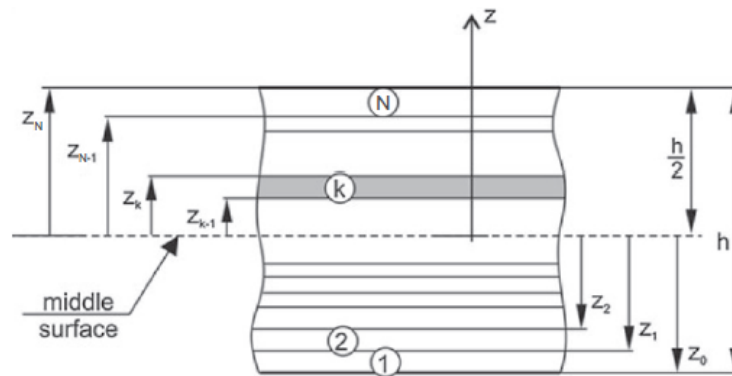
1.5.5 Stapelen

Wanneer een aantal lamellen gestapeld wordt tot een laminaat, moeten de uitwendige krachten in het vlak in evenwicht zijn met de totale lamelkrachten. De rekken in een lamel worden mede bepaald door de kromming van het laminaat. Voor evenwicht tussen inwendige en uitwendige krachten geldt dan:

$$[N] = A\{\varepsilon\} + B\{\kappa\}$$

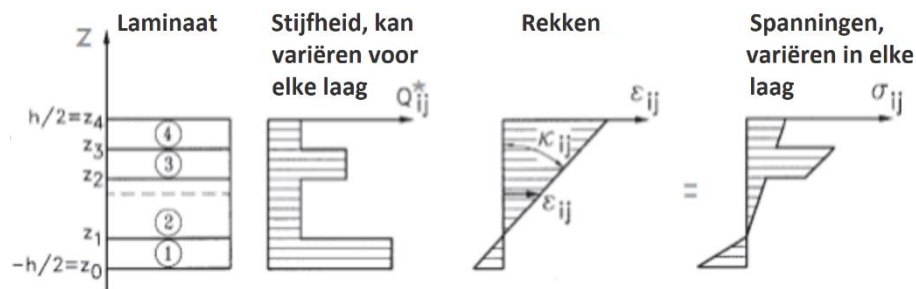
Hierin stellen [N] de uitwendige (lijn)belasting voor, A de lamel(lijn)spanning als gevolg van de rekken in het vlak, en B de bijdrage van de kromming van het laminaat (κ). Een soortgelijk verband als hierboven kan geschreven worden voor het evenwicht tussen uitwendige momenten en inwendige rekken:

$$[M] = B\{\varepsilon\} + D\{\kappa\}$$



1.5.6 Stijfheidsmatrix van een laminaat

De spanningen in een laminaat variëren in het algemeen over de dikte. Het is daarom handig om te werken met de krachten en momenten die aangrijpen op een totale doorsnede van een laminaat.



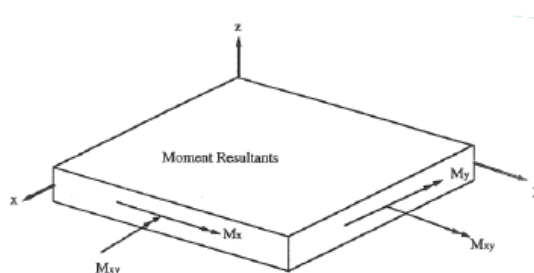
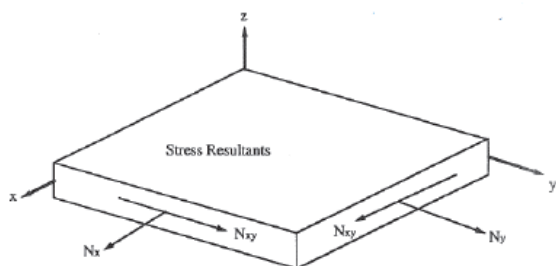
$$[\bar{E}]_k \cdot (\{\varepsilon\} + z\{\kappa\}) = \{\sigma\}_k$$

Krachten en momenten zijn de sommatie van alle spanningen op elke lamel, rekening houdend met de dikte van elke lamel. Van deze spanningen in een lamel is de relatie bekend met de rekken. De relatie tussen deze krachten en momenten enerzijds en de rekken en krommingen anderzijds kan nu ook worden vastgelegd.

Aangenomen wordt dat het verloop van de spanningen binnen een lamel lineair is, maar een sprong kan vertonen bij de grensvlakken van de verschillende lamellen. Dit betekent dat alleen kan worden geïntegreerd binnen de lamellen en er gesommeerd moet worden over de lamellen.

De vergelijking tussen kracht/moment in de vorm van een integraal over de hoogte is derhalve een sommatie van de spanningen werkend op elke lamel over de doorsnede van een laminaat.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \quad \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz$$



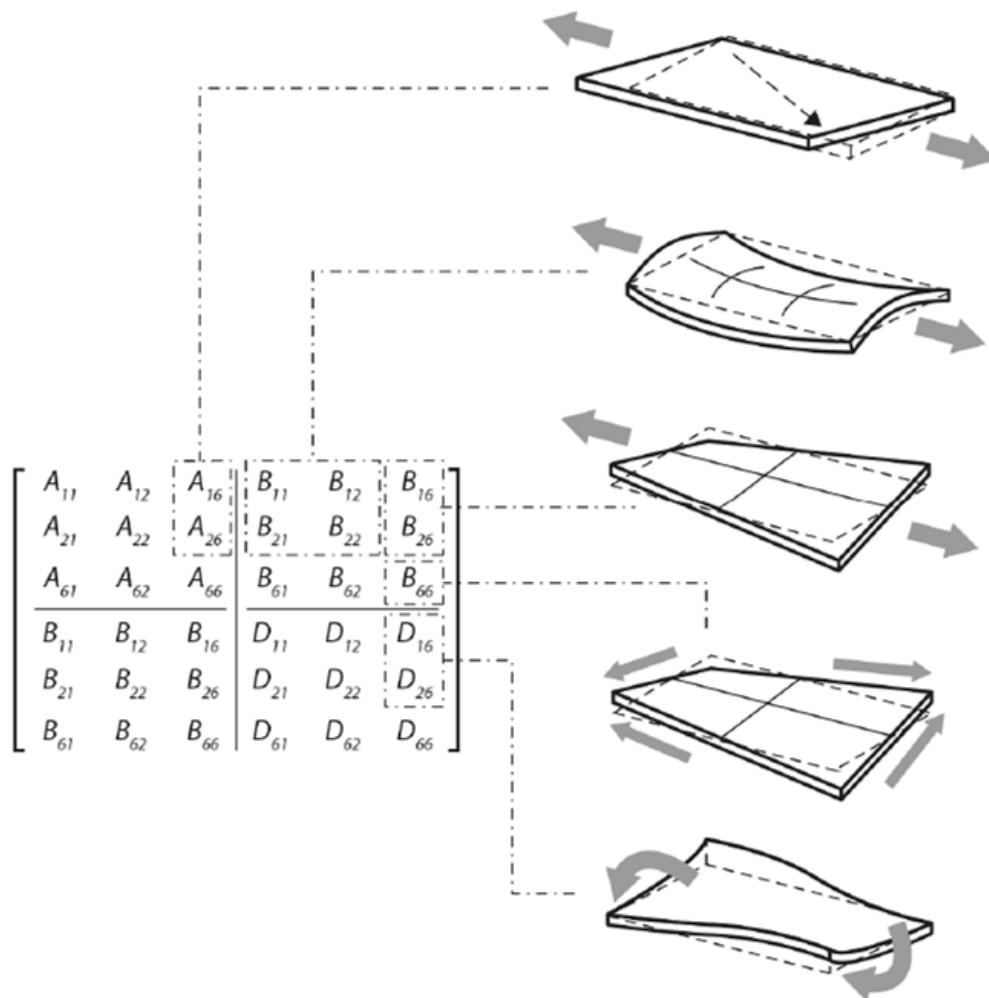
Bovenstaande vergelijkingen kunnen omgezet worden in een relatie tussen de krachten en momenten enerzijds en rekken en krommingen anderzijds.

$$\begin{aligned} \{N\} &= \sum_{k=1}^n \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{E}]_k \{\varepsilon\} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{E}]_k \{\kappa\} z dz \right) \\ \{M\} &= \sum_{k=1}^n \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{E}]_k \{\varepsilon\} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} [\bar{E}]_k \{\kappa\} z^2 dz \right) \end{aligned}$$

1.5.7 Vereenvoudigde ABD-matrix

De stijfheidsmatrix zoals in vorige sectie afgeleid is in veel gevallen niet helemaal gevuld. Het is dan gewenst om een koppeling te voorkomen tussen de buigtermen en de normaalkrachttermen of tussen verdraaiing en normaalkrachten en afschuifhoeken. Dit is het geval wanneer een laminaat symmetrisch is opgebouwd. De neutrale lijn ligt dan in het midden van de doorsnede. Bovendien zijn alle lagen onder de neutrale lijn gespiegeld met de lagen erboven voor wat betreft eigenschappen en dimensies. In dat geval is de koppelmatrix [B] nul en treedt er een grote vereenvoudiging op.

Een andere vereenvoudiging treedt op voor een orthotroop laminaat als er geen koppeling is tussen de normaalspanningen en de afschuifhoeken. Dit is het geval indien een laminaat is opgebouwd uit paren identieke orthotrope lamellen waarvan de oriëntaties elkaars spiegelbeeld zijn ten opzichte van de laminaat hoofdrichtingen. Dit resulteert in $A_{16} = A_{26} = 0$. In onderstaande figuur is grafisch uitgelegd wat de koppeling inhoudt tussen de krachten, momenten en vervormingen.



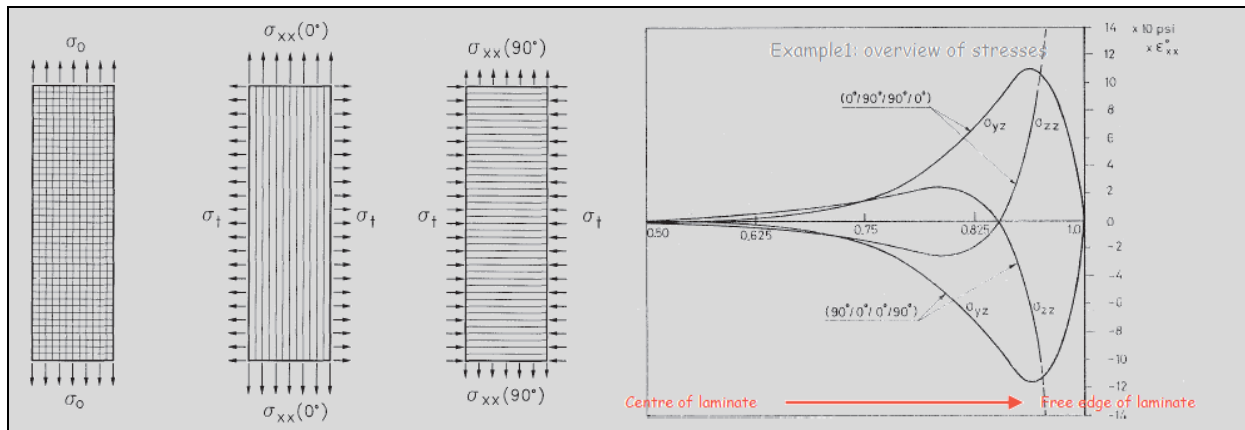
1.5.8 Interlaminare spanningen

Interlaminare spanningen zijn alle spanningen σ_{33} (normaalspanning), τ_{13} en τ_{23} (transversale schuifspanningen) die loodrecht op het laminaat aangrijpen. Deze kunnen het gevolg zijn van pure belasting in het vlak door de specifieke opbouw van de orthotrope lamellen in het laminaat. Deze spanningen kunnen niet met de KLT berekend worden en worden hier volledig verwaarloosd, maar kunnen leiden tot schade in het laminaat die op het eerste zicht niet te verwachten is.

Voorbeeld interlaminare spanning

Onderstaand laminaat, met een $[0/90]_s$ opbouw (wat overeenkomt met $[0/90/90/0]$), wordt in trek belast in de 0° -richting. De 90° -lagen verhinderen de Poissoncontractie van de 0° -lagen in de dwarsrichting van het laminaat. Door de belasting ontstaan trekspanningen in de 0° -lagen. Langs de andere kant veroorzaakt de verhinderde Poissoncontractie van de 0° -lagen een drukspanning in de 90° -lagen.

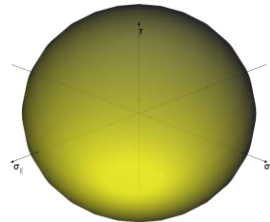
De grafiek hieronder geeft de spanning loodrecht op het laminaat en de schuifspanning tussen de lamellen weer. Hierin kan men zien dat door de aangelegde trekkracht spanningen aan de rand van het laminaat ontstaan die loodrecht werken op het vlak van het laminaat. Door deze spanningen ontstaat er een peel force (afpelkracht) aan de rand van het laminaat die ervoor kan zorgen dat de lamellen uit elkaar worden getrokken. Dit kan uiteindelijk leiden tot het falen van het laminaat.



1.6 Sterktecriteriën

1.6.1 Von Mises

In tegenstelling tot metalen is het Von Mises sterktecriterium niet van toepassing voor het evalueren van de sterkte van composieten, aangezien composietmaterialen geen vloeigedrag kennen.



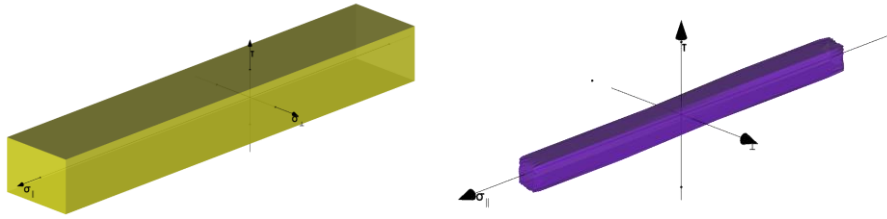
In de richting van de vezels zou men de sterkte uit de vezelsterkte en het gehalte vezels kunnen halen. Dwars erop moet men ervan uitgaan dat de sterkte van het hars dominant is in de berekening van de sterkte, maar de invloed van de vezels moet verdisconteerd worden. Een complicatie treedt op wanneer meerassige belastingen op een lamel plaatsvinden. Dat kan doordat een constructie daadwerkelijk in verschillende richtingen tegelijkertijd wordt belast, maar het kan ook komen doordat een bepaalde lamel door de buurlamellen meerassig wordt belast, of door de constructie van de lamel zelf. Zo zal in een lamel met $\pm 45^\circ$ -vezels die op trek wordt belast in de 0° -richting zowel trek als schuifspanning heersen.

Voor het inschatten van de sterkte onder meerassige belasting wordt dan ook vaak een zogenaamd meerassig spannings- of rek criterium toegepast. Dit kan een onafhankelijk criterium zijn (de sterkte in een hoofdrichting wordt niet beïnvloed door de spanning in een andere richting), of een interactief criterium (sterkte wordt beïnvloed door spanning in andere richting).

De 3D-vormen omschrijven de spanningsruimte waarbinnen een laminaat of een lamel nog niet bezwaken zijn.

1.6.2 Maximum stress/maximum strain

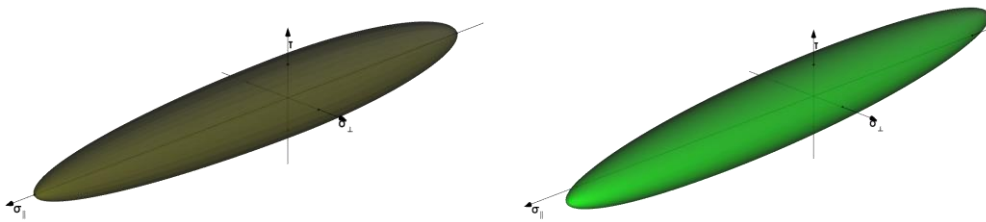
De eenvoudigste onafhankelijke faalcriteria kijken of tenminste één van de spanningen of rekken groter is dan toelaatbaar. Hierbij worden de spanningen of de rekken in de andere richtingen niet mee in rekening gebracht. In dit geval spreekt men respectievelijk over het "Maximum Stress" en "Maximum Strain" criterium waarvoor de 3D-vormen worden weergegeven.



Het nadeel hiervan is dat dit criterium voorspelt dat bijv. in lengterichting altijd de éénassige treksterkte kan worden gehaald. In werkelijkheid zal een tegelijkertijd optredende afschuif- of dwarsspanning ervoor zorgen dat de treksterkte niet gehaald wordt. De treksterkte in richting '1' is dus afhankelijk van zowel de spanning in richting '2' als de schuifspanning.

1.6.3 Tsai-Hill/Tsai-Wu

Een voorbeeld van een toelaatbare ruimte is aangegeven door de asymmetrische ellipsoïde zoals voorgesteld door het Tsai-Hill criterium en de opvolger daarvan, het Tsai-Wu criterium.

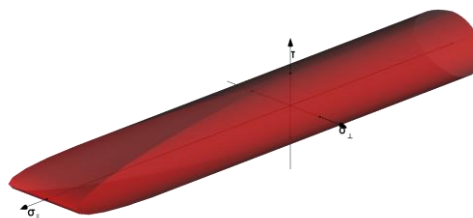


Meestal wordt een faalcriterium in twee dimensies getekend, waarmee dus de projectie van de 3D-lichamen op het (σ_1, σ_2) - of het (σ_2, τ_{12}) -vlak gevisualiseerd wordt. Omdat de sterktes van een lamel of laminaat in trek- en drukrichting en in langs-, dwars-, en schuifrichting meestal niet gelijk zijn, is de balk en de ellipsoïde niet symmetrisch t.o.v. de oorsprong.

1.6.4 Hashin en Puck

Bovenstaande criteria geven enkel informatie in verband met de totale sterkte van het laminaat wanneer deze belast wordt met een bepaalde belasting. Verder bevatten deze geen informatie in verband met het faalmechanisme. Om die reden wordt in de composietwereld vaak gebruik gemaakt van een faalcriterium dat een onderscheid maakt tussen de verschillende faalmechanismen. De meest gekende zijn de Hashin en Puck faalcriteria.

Het Hashin-criterium identificeert vier verschillende modi van falen voor het composietmateriaal: vezelbreuk onder trek, vezelbreuk onder druk, matrixbreuk onder trek en matrixbreuk onder druk. Het criterium maakt gebruik van twee gebruikersspecifieke parameters, namelijk een coëfficiënt die bepaalt wat de bijdrage is van de longitudinale schuifspanning tot de vezelbreuk onder trek en een transversale afschuifsterkte van het composietmateriaal in het vlak loodrecht op het laminaat.



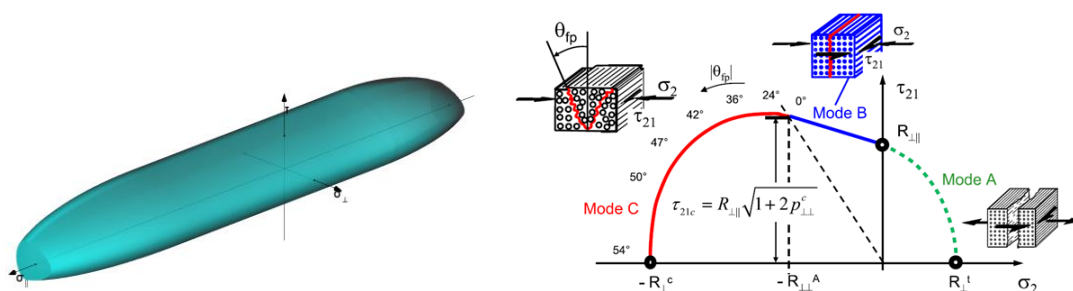
Het Puck-criterium identificeert zowel vezelbreuk als het falen tussen de vezels (inter-fiber failure) in een unidirectioneel composiet. Daarbij maakt het criterium een onderscheid tussen drie verschillende fysieke faalmodi, respectievelijk het falen tussen de vezels en twee verschillende fysieke modi bij het falen van de vezels zelf. De eerste wijze van vezelbreuk is het falen onder een trekbelasting en de tweede is het falen onder een drukbelasting door het 'uitknikken' van de vezels. Het Puck-criterium maakt gebruik van de volledige 3D-toestand van spanningen en rekken in het laminaat.

Het falen tussen de vezels in het Puck-criterium omvat zowel het scheuren van het hars als de onthechting tussen het hars en de vezels. Het criterium onderscheidt drie verschillende faalmodi voor het falen tussen de vezels, aangeduid als modi A, B en C. Deze faalmodi worden bepaald aan de hand van de oriëntatie van de breukvlakken ten opzichte van de vezelversterking.

Mode A komt overeen met een breukhoek van 0° , wat betekent dat de normaal op het breukvlak een hoek van 0° vormt met de richting van de spanning. Het criterium wordt ingeroepen als de dwarsspanning in het composiet groter is dan 0 MPa, wat aanleiding geeft tot een scheur loodrecht op de dwarse belasting.

Mode B komt overeen met een transversale drukspanning (die de scheurvorming tegengaat) gecombineerd met een longitudinale schuifspanning die lager is dan een breukweerstand.

Modus C komt overeen met een transversale drukspanning gecombineerd met een longitudinale afschuifspanning die groot genoeg is om breuk te veroorzaken in een vlak parallel aan de vezels maar waarvan de normaal een van 0° verschillende hoek vormt met de spanningsrichting. In de context van de KLT dient de breukhoek niet gedefinieerd te worden, aangezien deze niet relevant is voor de voorspelling van het falen van het laminaat met alleen spanningen en rekken in het vlak en geen degradatie van materiaaleigenschappen.

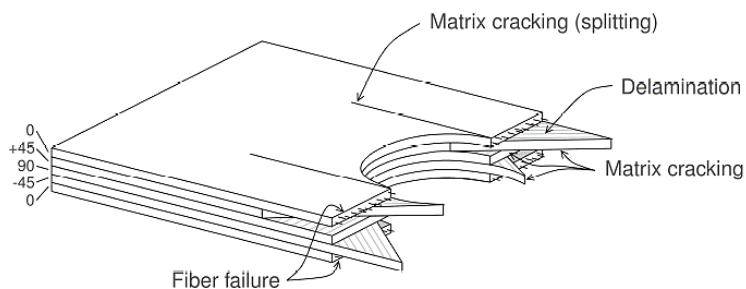


Ten slotte moet men goed in het oog houden wat er wordt bedoeld met 'falen'. Bij een sterkte-analyse spreekt men vaak van 'first-ply-failure' en 'last-ply-failure'. Bij first-ply-failure berekent men voor een laminaat welke lamel als eerste bezwijkt. Bij sommige laminaten hoeft dat niet te betekenen dat het laminaat meteen bezwijkt. Sterker nog, er kan sterkte 'over' zijn.

Door de berekening uit te breiden en na te gaan in welke volgorde de lamellen bezwijken en welk deel van de belasting na bezwijken van elke lamel overgedragen wordt op de resterende lamellen, kan men uiteindelijk het volledig bezwijken van het laminaat beschrijven. Dit staat bekend als 'last-ply-failure'. Een dergelijke analyse is minder conservatief (na falen van de laatste lamel is geen sterkte meer over), en de berekening is voor sommige laminaten ingewikkelder. Voor een unidirectioneel laminaat liggen first- en last-ply-failure dicht bij elkaar. Voor een meerassig laminaat is first-ply-failure bijvoorbeeld interessant als gevaar op lekken van belang is, bijvoorbeeld bij drukvaten.

1.7 Schadefenomenen

Een belangrijk verschil met isotrope materialen is dat, afhankelijk van de laminaatopbouw en de belasting, er een veelheid aan faalmechanismen bestaat. De belangrijkste worden in deze sectie besproken. De faalmechanismen worden in twee categorieën ingedeeld, namelijk mechanische en overige faalmechanismen. Onder de overige faalmechanismen verstaat men voornamelijk schade die optreedt ten gevolge van de omgevingscondities. Deze worden verder in sectie 1.12 Duurzaamheid (Durability) behandeld. Daarnaast kan men de mechanische faalmechanismen verder onderverdelen in twee subcategorieën, namelijk intra- en interlaminaire faalmechanismen. In het eerste geval treedt het falen van het laminaat op in een laag van het laminaat terwijl in het tweede geval falen optreedt tussen twee opeenvolgende lagen van het laminaat.



1.7.1 Intralaminair

De belangrijkste schadefenomenen in de intralaminare categorie zijn het splijten van het laminaat waarbij een breuk ontstaat in de interface tussen de vezel en het hars, en vezelbreuk en -knik waarbij respectievelijk een te grote trek- en drukbelasting zorgt voor het falen van de individuele vezels.

Vezel/harsinterfacebreuk (splijten)

Wanneer veel vezels in één richting lopen en de hechting dwars op de vezels op één of andere wijze niet voldoende is, kan een composiet relatief gemakkelijk splijten. Bij splijten ontstaan scheuren in het composiet, parallel aan de vezels en door de gehele dikte van één of meer lamellen. Een goede remedie tegen splijten is het laminaat zodanig op te bouwen dat lamellen waarin de vezels in één richting georiënteerd zijn afgewisseld worden met lamellen met vezels in andere richtingen. Vaak zijn zelfs UD-lamellen voorzien van de nodige dwarsversterking die splijten tegengaat.

Vezelbreuk en -knik

Vezelbreuk is een explosief faalmechanisme dat kan optreden wanneer de vezels in de axiale richting op trek belast worden. Dit faalmechanisme treedt in de meeste gevallen als laatste op gezien de grotere mechanische sterkte van de vezels in de axiale richting in vergelijking met deze van het matrixmateriaal.

Op materiaalniveau dient men bij composietmaterialen ook rekening te houden met schade door knik. Hierbij kunnen de vezels, vezelbundels en individuele lamellen in het laminaat onder een drukbelasting uitknikken. Wanneer een lamel uitknikt, ontstaan vaak delaminaties als gevolgschade zoals te zien is in onderstaande figuur. De weerstand tegen macroscopische knik kan verhoogd worden door een stijver materiaal of een stijvere constructie te gebruiken of een kleinere kniklengte in te bouwen, bijvoorbeeld door het verkleinen van plaatvelden, of het gebruik van (dikkere) sandwichlagen.



1.7.2 Interlaminair

Delaminaties zullen in de interlaminare categorie het belangrijkste faalmechanisme vormen. Delaminatie lijkt op splijten, maar nu ontstaat de scheur in het vlak van het laminaat, tussen twee

lamellen (Figuur 27). Deze faalvorm kan gemakkelijk optreden aangezien de schuifspanning tussen lamellen hoog kan zijn en er meestal geen versterking tussen de lagen is aangebracht. Delaminatie kan overal beginnen in een composiet, maar de randen van een laminaat zijn het gevoeligst. Wanneer twee lamellen zeer verschillende stijfheden hebben (of hun hoogste stijfheid bijvoorbeeld in twee verschillende richtingen ligt) is het laminaat ook gevoeliger voor delaminatie. Dit is inherent het geval bij sandwichmaterialen, waarbij de kern en de huiden meestal een groot stijfheidsverschil hebben. Ook als de huid van een sandwich loslaat van de kern is dit delaminatie.



1.8 Testen van composieten

Het beproeven van composietmaterialen vraagt om een andere benadering dan het testen van isotrope materialen door onder meer de vezelstructuur, het verschil tussen trek- en drukeigenschappen en de faalmechanismen van composieten. In deze sectie wordt een overzicht van de belangrijkste meet- en testmethoden en de overeenkomsten en verschillen met het beproeven van isotrope materialen weergegeven.

Het beproeven van een constructiemateriaal gebeurt in de praktijk om een aantal mogelijke redenen, die altijd neerkomen op het onderbouwen van de aannames die gemaakt werden bij het ontwerp. Bijvoorbeeld indien in het ontwerp de materiaalstijfheid verwerkt zit in de voorspelling van de doorbuiging of eigenfrequentie van de constructie, dan kan de waarde voor deze stijfheid in eerste instantie ingeschat worden op basis van een ontwerprichtlijn voor composietstructuren, zoals de Nederlandse CUR-aanbevelingen, of aan de hand van metingen van het ruwe composietmateriaal. Nadien kan de doorbuiging of eigenfrequentie van de uiteindelijke constructie gemeten worden om zo na te gaan of de aanname juist was. Er zijn verschillende categorieën van beproevingen:

- Kwaliteitscontrole op de weefsels en hars; voldoet het materiaal aan de door de leverancier gestelde specificaties?
- Invoerdata genereren voor een ontwerp(detail), bijvoorbeeld door het gedrag van een verbinding te testen;
- Full-scale test, een beproeving op een schaalmodel of op een volledige constructie.

Welke categorieën van testen uitgevoerd dienen te worden, en welke test- en meetmethoden gebruikt worden hangt af van het specifieke geval. In alle gevallen moet de test representatief zijn voor de werkelijke situatie. De testmethode en het te testen materiaal of de te beproeven constructie moeten zoveel mogelijk zijn afgestemd op het reproduceren van de spanningen en rekken die in werkelijkheid kunnen optreden.

Vanuit structureel oogpunt is het belangrijk te noteren dat parameters zoals sterkte, stijfheid, trillingsdemping enz. niet zo eenvoudig uit klassieke materiaaltesten zoals een drukproef op een betonkubus of een trekproef op wapeningsstaal te halen zijn. De basisgegevens van sterkte en stijfheid van het hars en de vezels zijn bekend, maar het oneindige aantal mogelijke combinaties van die twee materialen in massaverhouding en vezelrichtingen laat alleen een voorspelling toe van de eigenschappen van het uiteindelijke composiet. Het is in deze sector niet gebruikelijk om testen te eisen op dat composietmateriaal, dat enkel in exact dezelfde samenstelling beschikbaar is in de brug

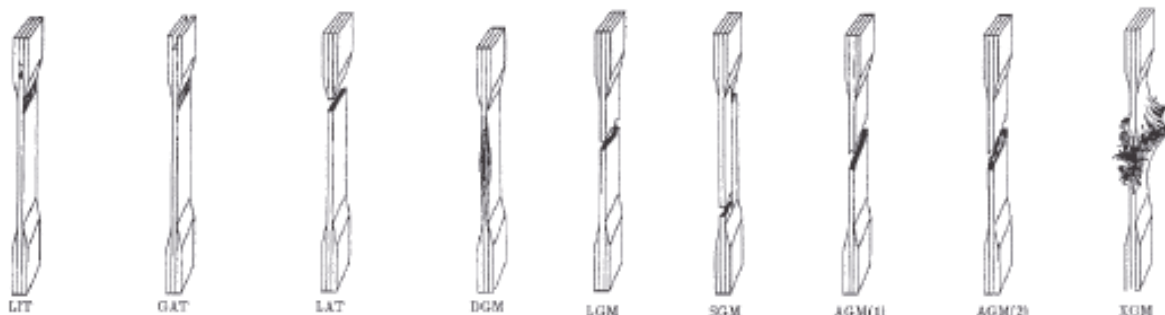
zelf. Stijfheid en trillingsgedrag worden typisch gemeten op de volledige constructie, “as-built” of voorafgaand aan de plaatsing. Dit houdt dus een verschuiving in op het vlak van kwaliteits- en opleveringscontroles, van materiaalniveau naar structuurniveau.

1.8.1 Trekproef

De testmethode van de trekproef bepaalt aan de hand van de ASTM D3039 norm de treksterkte in het vlak van vezelversterkte kunststoffen met een hoge elasticiteitsmodulus. De composietmaterialen beschreven in deze norm zijn beperkt tot continue of discontinue vezelversterkte composieten waarin het laminaat gebalanceerd en symmetrisch is ten opzichte van de testrichting.

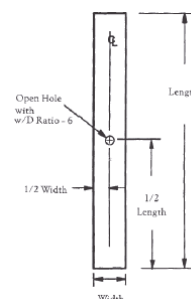
Een dunne composieten coupon met een constante rechthoekige dwarsdoorsnede wordt hierbij in de grepen van een mechanische testmachine gemonteerd en monotoon onder trek belast terwijl de oplopende belasting geregistreerd wordt. De uiteindelijke sterkte van het materiaal kan worden bepaald aan de hand van de maximale belasting die vóór falen wordt bereikt. Als de rek van de coupon wordt gemeten gedurende de test met rek- of verplaatsingstranducers, kan de spanning-rekrespons van het materiaal worden bepaald, waaruit de uiterste trekspanning, de elasticiteitsmodulus, de Poisson-factor en de overgangsrek afgeleid kunnen worden.

Deze testmethode is ontworpen om gegevens over de treksterkte te bepalen voor materiaalkarakterisering, onderzoek en ontwikkeling, kwaliteitswaarborging, structureel ontwerp en analyse. Factoren die de trekrespons beïnvloeden moeten worden gerapporteerd. Hiertoe behoren onder meer: het type materiaal, de gebruikte vervaardigingsmethode(n) voor materiaalvoorbereiding en -opmaak, monsternamen, monstervoorbereiding, monsterconditie, testomstandigheden, testuitlijning en grip, testsnelheid, temperatuur op gegeven tijdstippen, luchtbellengehalte en volumepercentage van de versterking.



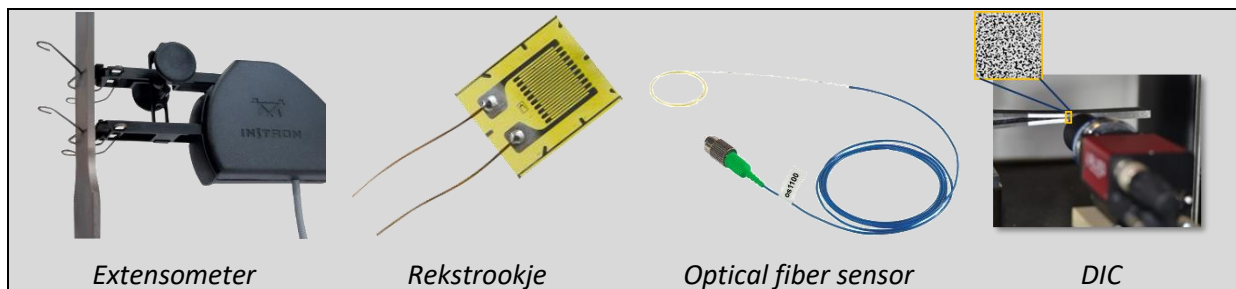
Trekproef met gat (ASTM D5766)

Als alternatief op de gewone trekproef waarbij de plaats van falen in het laminaat steeds een onzekere parameter vormt, kan een gat aangebracht worden in het centrum van de coupon. Op deze manier zal het proefstuk steeds bezwijken in het midden tussen de twee klemmen van de trekbank, aangezien de sectie hier drastisch verminderd is en de optredende spanningen over de resterende doorsnede aanzienlijk groter zijn dan in de rest van het laminaat. Om deze redenen wordt deze proef gebruikt bij vermoeiingstesten en om schademodelen te valideren.



Opmeten van vervormingen

De opmeting van de vervormingen van een proefstuk of een structuur kan op verschillende manieren gebeuren. Zo kunnen de sensoren zowel aan het oppervlak als inwendig worden aangebracht op of in het proefstuk of de structuur. Verder wordt tegenwoordig vaak gebruik gemaakt van een optische meetmethode waarbij geen sensoren op of in het oppervlak dienen verwerkt te worden, en waarbij de opmetingen gebeuren aan de hand van camera's. Hieronder volgen enkele voorbeelden van sensoren voor de opmeting van de vervormingen in een proefstuk of structuur.



Extensometer

Rekstrookje

Optical fiber sensor

DIC

Extensometer

Een extensometer meet aan de hand van twee beentjes de relatieve verplaatsing over het gebied tussen de benen. Hierbij kan deze afstand tussen de benen van de extensometer aangepast worden om een meer gedetailleerd of een meer algemeen beeld van de vervormingen op een specifieke plaats te krijgen. Deze meettechniek kan gebruikt worden tot het falen van het laminaat, maar dit kan leiden tot eventuele beschadiging van de meetapparatuur, voornamelijk bij het explosief falen door vezelbreuk van vezels parallel aan de belastingsrichting in het laminaat.

Rekstrookje

Een rekstrookje wordt met behulp van een lijm aan het oppervlak van het proefstuk bevestigd en bepaalt aan de hand van weerstandsmetingen over de ingewerkte koperen draadjes wat de rek is over het rekstrookje op die specifieke plaats. De opgemeten vervorming bij een rekstrookje is gelimiteerd tot 3%, waardoor dit bij sommige configuraties van laminaten niet bruikbaar is.

Optical fiber sensor

Een optical fiber sensor kan zowel verwerkt worden in als bevestigd worden aan het proefstuk. Om deze reden wordt deze vaak tijdens de productie ingewerkt in een dragende structuur, zoals een brugdek, waardoor de conditie van het element op elk moment geïnspecteerd kan worden. Met deze optische sensoren is het ook mogelijk om meerdere metingen uit te voeren langsheen één sensorstreng door het aanbrengen van een (BRAGG) grating op bepaalde afstanden.

Digital image correlation (DIC)

Met de toenemende kwaliteit en betaalbaarheid van camerasystemen wordt de optische digital image correlation methode steeds meer toegepast voor het opmeten van de vervormingen. Aangezien het hier gaat over een optische techniek is er geen contact met het proefstuk en kan deze meetmethode gebruikt worden tot het volledige falen van het proefstuk. Om goed te werken moet een willekeurig spikkelpatroon aangebracht worden op één van de oppervlakken van het proefstuk. Aan de hand van dit spikkelpatroon monitort de software de verplaatsing van de spikkels tussen twee opeenvolgende opnames, waardoor de verplaatsing in twee of drie dimensies weergegeven kan worden, afhankelijk of er één of twee camera's worden gebruikt. Hierdoor kan een full field verplaatsingsbeeld gevormd worden van het oppervlak van het proefstuk, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een rekstrookje of extensometer waarbij de rek specifiek op één plaats wordt bepaald. Deze techniek is tevens toepasbaar op proefstukken van heel uiteenlopende groottes. Zo kan het toegepast worden op couponniveau, maar kan het evengoed de verplaatsingen meten van een volledig brugdek. Het enige verschil tussen de beide voorbeelden is de grootte van het spikkelpatroon dat dient aangebracht te worden op het oppervlak van het proefstuk. Naast deze voordelen zijn ook nadelen verbonden aan deze meettechniek. Zo is de opstelling van de camera's zeer gevoelig aangezien ze opnieuw gekalibreerd dienen te worden telkens ze verplaatst worden. Verder is enige ervaring en expertise vereist bij de verwerking van de meetdata.

1.8.2 Drukproef

Voor de drukproef worden twee varianten gebruikt, namelijk de drukproef met gat (ASTM D6484) en de drukproef na impact (ASTM D7137). In het eerste geval wordt op dezelfde manier als de trekproef

met een gat in het laminaat opnieuw een gat aangebracht om op voorhand de plaats van falen vast te leggen. Verder wordt deze op dezelfde manier als bij de trekproef gebruikt om de resterende sterkte bij het falen van het laminaat in druk vast te leggen en om schademedellen te verifiëren. De tweede proef wordt enkel gebruikt om de resterende sterkte van het laminaat na verschillende impacten in druk te bepalen.



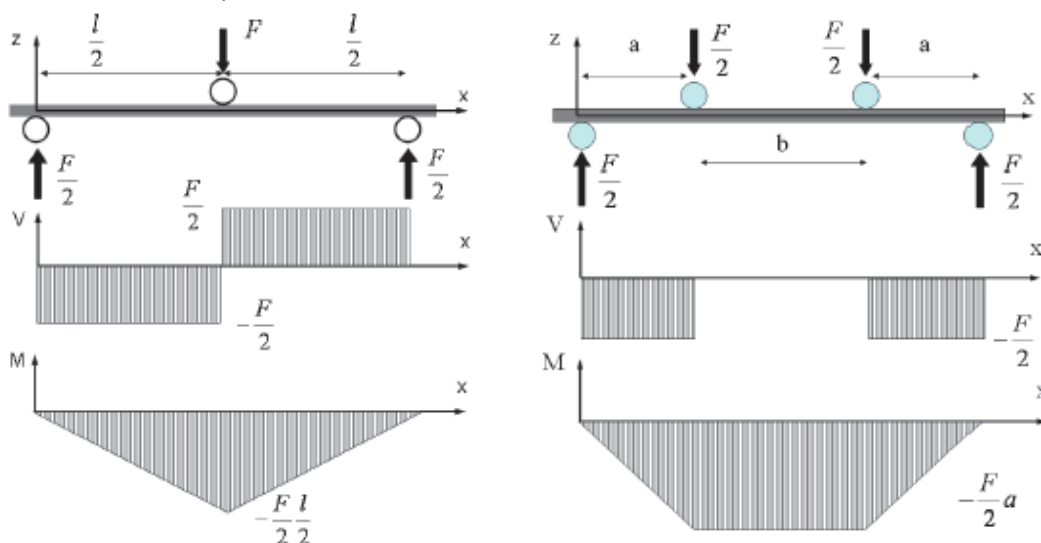
OPMERKING: Bij een drukproef wordt steeds gebruik gemaakt van een anti-kniksysteem, aangezien men hier te maken heeft met zeer dunne structuren (t.o.v. de breedte en lengte) die een grote neiging hebben om uit te knikken wanneer deze belast worden onder druk.

1.8.3 Drie- en vierpuntsbuigproef

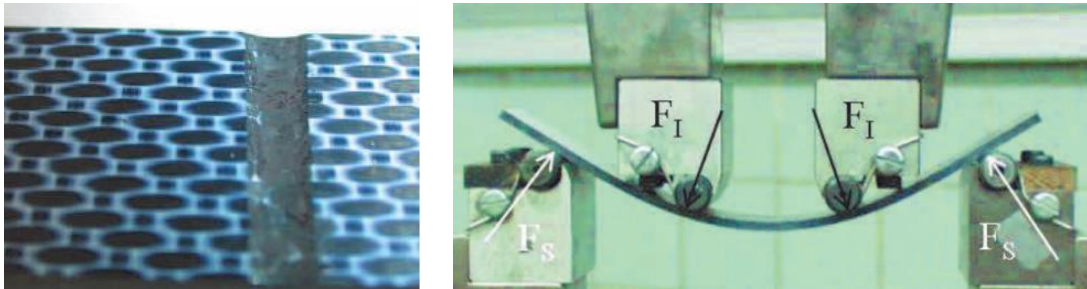
Bij een driepuntsbuigproef variëren de momenten in de doorsneden van het laminaat over de lengte van het laminaat volgens een driehoekig verloop. De dwarskrachten in het laminaat zijn in deze beproevingsmethode constant over de lengte. Hierdoor is geen zuivere buiging aanwezig op het proefstuk en wordt vaak geopteerd om een vierpuntsbuigproef uit te voeren. Hierbij hebben de momenten een trapeziumvormig verloop en zijn er geen dwarskrachten tussen de twee indrukingscilinders en daarbuiten hebben deze een constante waarde.

Een drie- of vierpuntsbuigproef wordt vaak uitgevoerd in het kader van een kwaliteitscontrole van het laminaat aangezien deze makkelijk uit te voeren is. Afhankelijk van de opbouw van het laminaat kunnen belangrijke mechanische eigenschappen afgeleid worden.

Voor een symmetrisch laminaat komt de maximale kracht (F_{max}) overeen met de effectieve (buig)sterkte van het laminaat en kan uit de verhouding van de kracht en de verplaatsing d de factor D_{11} uit de ADB-matrix bepaald worden.

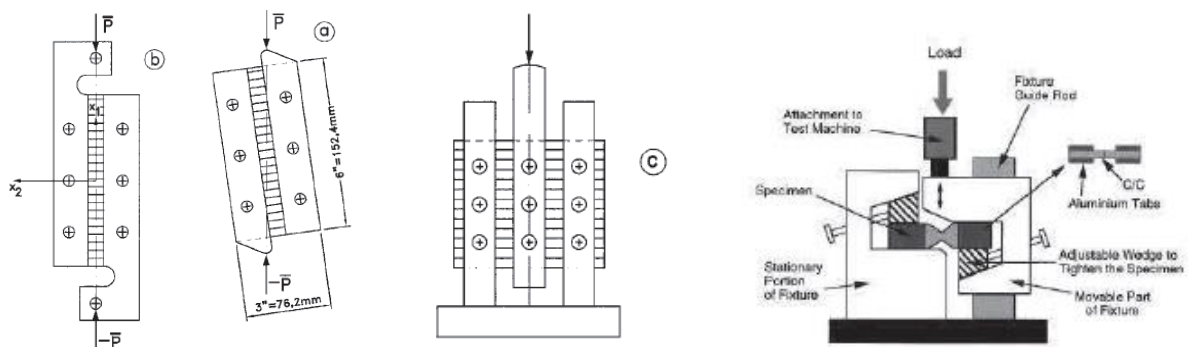


OPMERKING: De correcte interpretatie van de resultaten kan aangetast worden door kleine maar relevante, lokale indeukingen ter hoogte van de steunpunten, wrijving op de steunpunten en grote doorbuigingen, die de aanname dat de vervormingen klein zijn verwerpen, waardoor de lineaire theorie voor buiging niet langer geldig is.



1.8.4 Afschuifproef

Een afschuifproef (ASTM D4255) bepaalt in de meeste gevallen aan de hand van een 'rail shear' opstelling (eerste drie figuren hieronder) de afschuifeigenschappen in het vlak van het laminaat. Hierbij bestaan opstellingen waarbij het laminaat langs zowel twee als drie kanten ingeklemd wordt tussen stalen rails. In het eerste geval wordt het laminaat in de langsrising langs beiden zijden ingeklemd waarna een trekkracht wordt aangelegd langs één van de beide kanten. In het geval dat drie rails worden gebruikt, wordt het laminaat terug langs beide zijden ingeklemd, maar wordt een derde rail in het midden tussen de twee inklemmingen aangebracht waarop de trekkracht wordt uitgeoefend. Daarnaast kan tevens een torsieproef op cilindrische laminaten (bv. drukvaten) of een trekproef op een $[\pm 45^\circ]_n$ laminaat uitgevoerd worden om de afschuifsterkte van het laminaat te bepalen. Door de steeds beter wordende DIC-technieken en camera's die hieraan gekoppeld zijn is het ook mogelijk om een Iosepescu proefopstelling (rechtse onderstaande figuur) te gebruiken voor het bepalen van de afschuifsterkte van het laminaat. Hierbij wordt een dog-bonevormige coupon gebruikt waarbij één zijde ingeklemd is en de andere zijde naar beneden wordt gedruwd door de proefopstellingen. Aan de hand van de DIC-analyse kunnen alle verplaatsingen en rekken in de coupon opgemeten worden, wat vroeger niet mogelijk was met rekstrookjes.



Afhankelijk van de opbouw van het laminaat kunnen belangrijke mechanische eigenschappen hiervan afgeleid worden.

- In een UD-laminaat waarbij de x-as in het verlengde ligt van de 1-as komt de maximale kracht tot falen (F_{max}) overeen met de uiterste afschuifsterkte S van het laminaat. De verhouding tussen de maximale kracht en de verplaatsing d levert de afschuifstijfheid (G_{12}).
- Voor een symmetrisch laminaat komt tevens de maximale kracht (F_{max}) overeen met de afschuifsterkte S , en levert de verhouding tussen de kracht en de verplaatsing de term A_{66} van uit de ADB-matrix.

1.8.5 Interlaminare breukmechanische proeven

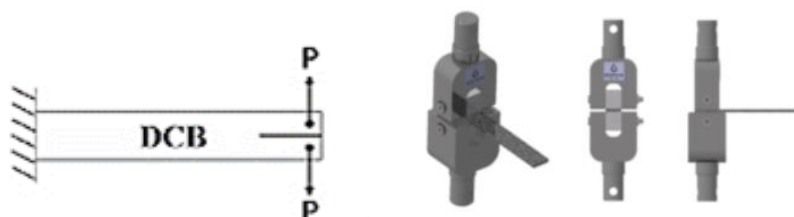
Bij interlaminare breukmechanische proeven wordt de sterkte van de interlaminare eigenschappen bepaald. Dit komt overeen met de kracht die nodig is om twee lagen in het laminaat van elkaar te scheiden en de kracht die nodig is om een delaminatie te laten groeien. Hiervoor zullen de volgende vier proeven gebruikt worden.

Short beam shear test (SBS) (ASTM D2344)

Bij een normale driepuntsbuigproef waarbij de lengte van het proefstuk vele malen groter is dan de dikte zijn de schuifspanningen in het laminaat verwaarloosbaar ten opzichte van de normaalspanningen in trek en druk. Echter wordt de schuifspanning wel belangrijk voor korte proefstukken waarbij de lengte van het proefstuk slechts vier à vijf keer de dikte is. Hierdoor kan de 'interlaminar shear strength' (ILSS), die de waarde heeft waarbij de verbinding tussen twee lagen verbroken wordt, bepaald worden aan de hand van een driepuntsbuigproef op een zeer klein proefstuk. Tevens vormt deze waarde een goede indicator voor de kwaliteit van de polymerisatie of de uitharding van het hars in het laminaat.

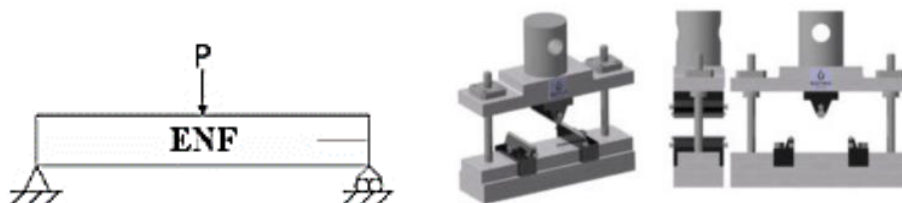
Double cantilever beam test (DCB) (ASTM D5528)

Bij de double cantilever beam test wordt het proefstuk met afmetingen 125x25 mm en een 63 mm lange gevormde delaminatie bevestigd in de proefopstelling door langs de boven- en onderkant van het laminaat aan de kant van de delaminatie scharnieren te bevestigen. Op één van de twee scharnieren wordt een trekkracht uitgeoefend, waardoor de aangebrachte delaminatie in het laminaat verder groeit. Aan de hand van DIC kunnen de verplaatsingen en daaruit volgend de rekken bepaald worden langs de doorsnede van het laminaat. Vervolgens kan via een berekening de Mode I breuksterkte van de interface tussen de vezels bepaald worden.



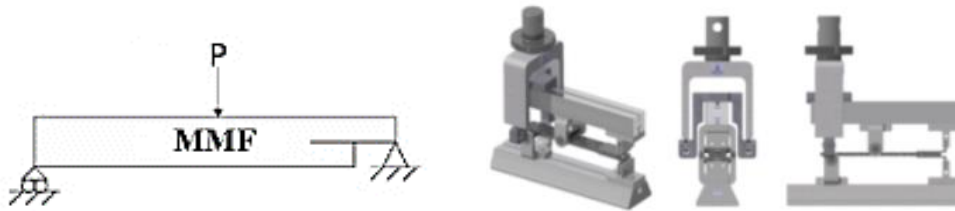
End notched flexural test (ENF) (ASTM D7905)

Het proefstuk met afmetingen van 160x25 mm en een 45 mm lange gevormde delaminatie wordt volgens een driepuntsbuigproef belast. Opnieuw worden aan de hand van DIC de rekken in de doorsnede van het laminaat bepaald, waaruit de Mode II breuksterkte van de interface tussen de vezels gehaald kan worden.



Mixed mode flexural test (MMF) (ASTM D6671)

Zoals de naam doet vermoeden wordt met de mixed mode bending meetmethode de verhouding tussen de Mode I en II breuksterkte van de interface tussen de vezels bepaald. De proefopstelling, zoals hieronder is weergegeven, is dan ook een menging tussen de DCB- en ENF-test. Het proefstuk heeft in dit geval een lengte van 150 mm en een aangebrachte delaminatie over een deel van de lengte van het proefstuk.



1.8.6 Vermoeingsproeven

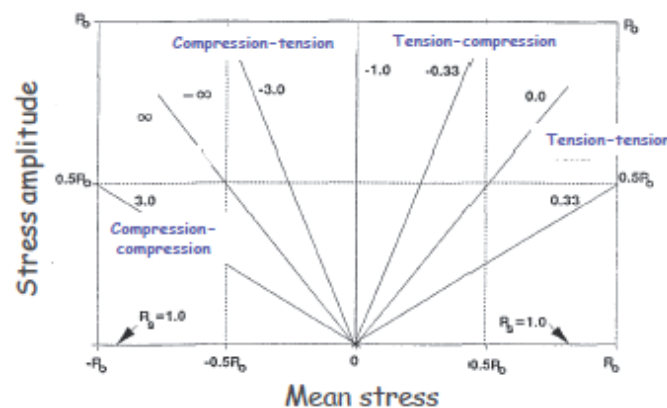
Vermoeingsproeven kunnen op twee niveaus uitgevoerd worden, namelijk lab-scale en full-scale, dit omdat de eigenschappen van een enkel laminaat in vele gevallen verschillen ten opzichte van de eigenschappen van de volledige structuur. Om die reden wordt aangeraden om vermoeingsproeven uit te voeren op de volledige 'as-built' structuur, zodat een goed inzicht verkregen kan worden op de werkelijke vermoeingsweerstand van de structuur.

Lab-scale vermoeingsproeven

Tijdens een vermoeingsproef wordt aangeraden om een realistische belasting aan te leggen op het proefstuk. Echter zijn deze werkelijke vermoeingsbelastingen vaak complex waardoor deze moeilijk te reproduceren zijn tijdens een proef. De reden hiervoor is het feit dat de servo-hydraulische machines die gebruikt worden voor vermoeingsproeven in het labo niet in staat zijn om deze complexe belastingen te reproduceren. Verder zijn vermoeingsproeven zeer duur en tijdrovend en in de meeste gevallen is de werkelijke vermoeingsbelasting op de composieten structuur niet gekend.

Hierdoor wordt de werkelijke belasting op een composieten structuur in de meeste gevallen eerst opgemeten, waarna ze omgezet wordt in een geïdealiseerde sinusfunctie met een bepaalde amplitude en frequentie. Naast de amplitude en de frequentie van de sinusgolf is de verhouding R tussen de minimale spanning en de maximale spanning ook belangrijk voor de evaluatie van een composieten proefstuk. Deze R -waarde ligt tussen de volgende waarden, afhankelijk van de belastingsituatie:

- $0 < R < 1$: Zuivere trek vermoeingsbelasting
- $1 < R < +\infty$: Zuivere druk vermoeingsbelasting
- $R < 0$: Trek-druk vermoeingsbelasting



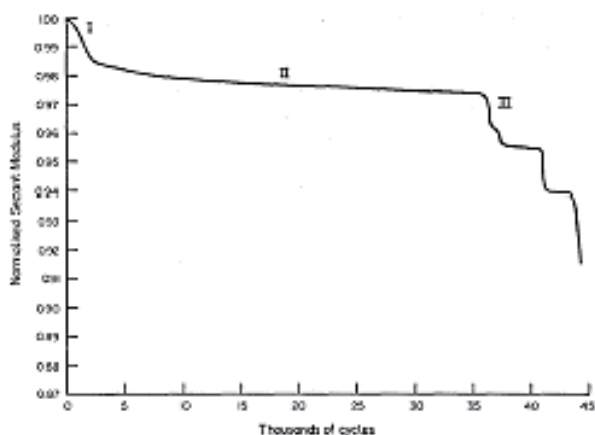
Vermoeingsproeven op coupons worden in de meeste gevallen uitgevoerd aan de hand van een trekproef, maar ook buig- en interlaminaire breukmechanische proeven kunnen hiervoor gebruikt worden om het specifieke gedrag van het laminaat te kennen. Tijdens deze proeven worden de belasting, de verplaatsingen, de rekken, de temperatuur en het aantal cycli bijgehouden.

OPMERKING 1: De belastingsfrequentie dient zo hoog mogelijk gehouden te worden om de duur van de vermoeingsproef te beperken. Echter is het vermoeingsgedrag van composieten afhankelijk van de frequentie ten gevolge van het visco-elastische matrixmateriaal. Voornamelijk wanneer de belastingsrichting niet in de richting van de vezels ligt, is de opwarming van het proefstuk aanzienlijk

door het afschuivingsdominante gedrag van het laminaat. Een lagere frequentie geeft de bestaande scheuren in het laminaat de tijd om te groeien in één cyclus waardoor de vermoeiingslevensduur van het laminaat lager zal liggen en bijgevolg overschat kan worden bij gebruik van een te hoge frequentie. Indien zeer lage frequenties gebruikt worden, is het breukgedrag een combinatie van vermoeiing en kruip.

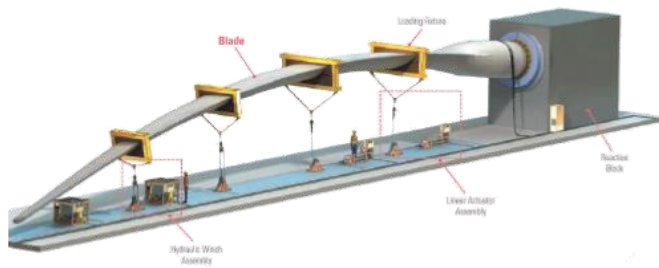
OPMERKING 2: De S-N curve verkregen uit een vermoeiingsproef, die de relatie aangeeft tussen belasting (S) en vermoeiingslevensduur (bijv. aantal wisselingen tot breuk, N), is enkel geldig voor de specifieke combinatie van couponafmetingen, lagenopbouw, belastingssituatie, omgevingscondities en gebruikte materialen uit de beproeving. Hierdoor kunnen resultaten uit de literatuur in de meeste gevallen niet vergeleken worden. Elke laag in het laminaat ondervindt andere spanningen, afhankelijk van zijn eigen mechanische eigenschappen en oriëntatie in het laminaat. Verder zorgt schade in een laag van het laminaat ervoor dat de mechanische eigenschappen van die laag in het laminaat verminderen waardoor een spanningsherverdeling ontstaat. De beschadigde laag is hierdoor onderworpen aan een lagere belasting en de overige lagen in het laminaat ondergaan een grotere belasting waardoor de schade in de overige lagen verder zal groeien. Dit proces zet zich voort tot het volledige laminaat bezwaken is.

In tegenstelling tot metalen, waarbij het merendeel van de vermoeiingslevensduur wordt besteed aan de initiëring van de scheur en scheurgroei tot het uiteindelijke falen slechts een klein deel van deze duur opneemt, zijn van in het begin afwijkingen (luchtinsluitingen, vreemde deeltjes, thermische scheuren, ...) aanwezig in het composietmateriaal ten gevolge van het productieproces. Hierdoor zijn spanningsconcentraties aanwezig tussen de vezels en het matrixmateriaal, die aanleiding geven tot microscheuren. Deze microscheuren verminderen de lokale spanningsconcentraties in het laminaat waardoor de schade in het laminaat geleidelijk groeit. Over de volledige levensduur van het laminaat kan een stijfheidsreductie waargenomen worden, zoals in de figuur is weergegeven. Hierin is fase I de initiatie van de scheur in het laminaat aan het begin van de levensduur van het composiet, fase II de voortplanting van de scheur en fase III het falen van het volledige composiet.



Full-scale vermoeiingsproeven

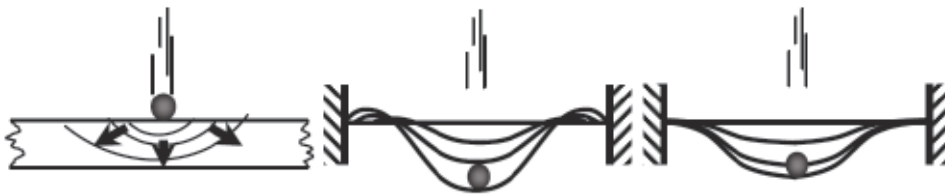
In sommige gevallen zoals bijvoorbeeld windturbinebladen en vliegtuigen wordt een full-scale vermoeiingsproef uitgevoerd om aan te tonen dat de composietstructuur de vooropgestelde vermoeiingslevensduur zal behalen. Om de duur van de proeven in te korten, worden meestal de aangelegde spanningen verhoogd. Door de lage frequentie van de aangelegde belasting kunnen deze proeven in sommige gevallen nog steeds één jaar in beslag nemen.



1.8.7 Impactproef

De impactproef wordt uitgevoerd volgens ASTM D7136. Drie verschillende impactregimes kunnen onderscheiden worden tijdens een impacttest, namelijk:

- Ballistische impact: zeer korte impacttijd met een dilatatiegolf-gedomineerde reactie;
- Impact met gemiddelde snelheid: korte impacttijd met een buig- en afschuivingsgolf-gedomineerde reactie;
- Impact met lage snelheid: lange impacttijd met een quasi-statische reactie.

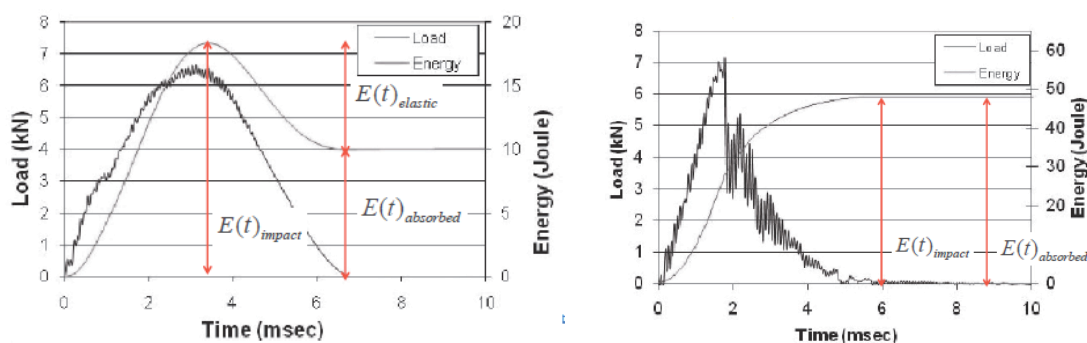


De opstelling bestaat uit een impactneus met een diameter van 20 mm die vanop een vastgelegde hoogte met behulp van een magnetische release losgelaten wordt op het proefstuk met afmetingen van 150x100 mm. Het proefstuk wordt met behulp van vier klemmen met een rubberen tip vastgehouden, zodat een simpele oplegging van het proefstuk bekomen wordt. Voor de impactneus kan gebruik gemaakt worden van verschillende vormen, zoals deze zijn weergegeven in de onderstaande figuur. De impact van de impactneus op het proefstuk, de impactenergie en de snelheid van de impactneus, worden met behulp van respectievelijk een hogesnelheidscamera, een load cell en een versnellingsmeter vastgelegd.



OPMERKING: Eenzelfde impactenergie (kinetische energie) kan op verschillende manieren gerealiseerd worden door gebruik te maken van een grote massa en een lage impactsnelheid of een kleine massa en een grote impactsnelheid. In het eerste geval wordt enkel de eerste eigenfrequentie aangesproken van het proefstuk, terwijl in het tweede geval voornamelijk de hogere modes bereikt worden.

De interpretatie van de impact gebeurt aan de ene hand door zorgvuldige interpretatie van de impactkracht in functie van de tijd. Aan de andere hand kan de energie gebruikt worden om de impact te karakteriseren. De evolutie van de energie geeft namelijk informatie in verband met mogelijke schade in het laminaat. In de onderstaande linkse grafiek is slechts een deel van de impactenergie opgenomen door het laminaat en kent deze een zekere elastische vervorming. Het laminaat in de rechtse grafiek neemt alle impactenergie op wat leidt tot ernstige perforatieschade van het laminaat.



Composietmaterialen kunnen door het bovenstaande gedrag gebruikt worden in toepassingen waarbij de impactenergie volledig dient opgenomen te worden en waarbij onherstelbare schade aan de structuur geen probleem vormt (bv. botsabsorbeerdere) en in toepassingen waar structurele integriteit gewenst is (bv. autoframe).

1.8.8 Niet-destructief testen (NDT)

Naast de bovenstaande destructieve proeven kan tevens schade opgespoord en beoordeeld worden aan de hand van niet-destructief onderzoek. Dit heeft als voordeel dat de methode zelf geen extra schade introduceert in het composiet, waardoor de structuur terug in gebruik genomen kan worden indien geen schade teruggevonden kan worden. Er bestaan verschillende methodes om eventuele schade in een composietmateriaal op te sporen, welke hieronder kort worden besproken.

Visuele inspectie

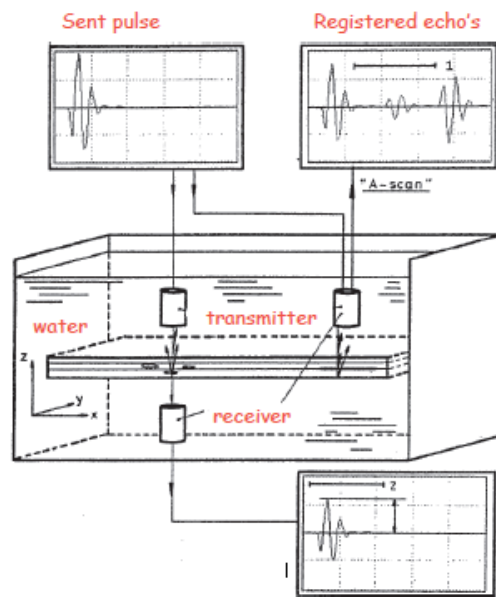
Visuele inspectie is de meest eenvoudige methode die nog steeds zeer veel informatie kan opleveren, aangezien de meeste types van schade in een composiet zichtbaar zijn met het blote oog. Visuele inspectie is vaak de eerste stap in de niet-destructieve evaluatie (NDE), zodat het zoekgebied voor eventuele schade verkleind kan worden of er beslist kan worden of verder gedetailleerd onderzoek noodzakelijk is. Ze kan zowel op macro- als microschaal (optische microscopie, elektronenmicroscopie) toegepast worden. In het laatste geval moet wel een deel uit de structuur verwijderd worden om deze onder de microscoop te plaatsen, waardoor dit aanzien kan worden als destructief onderzoek.

Ultrasonische inspectie

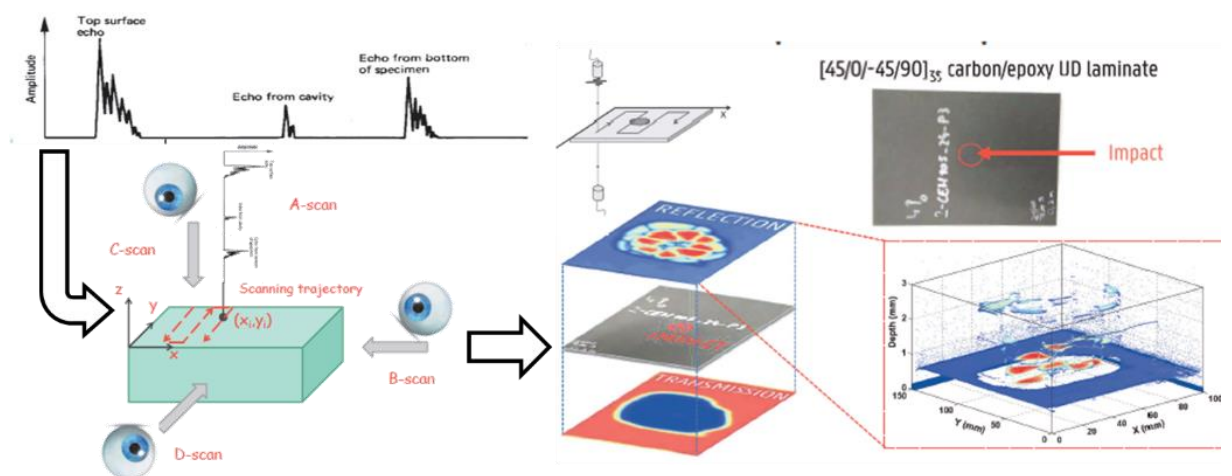
In de ultrasonische inspectietechniek wordt gebruik gemaakt van ultrasonische geluidsgolven met een frequentie hoger dan 20 kHz. Hierbij gaat het om een mechanische golf waarbij de voortplantingssnelheid afhankelijk is van het materiaal waarin deze zich bevinden. Elk materiaal heeft hierdoor een eigen akoestische impedantie. Door de zeer lage akoestische impedantie van lucht, wordt water (impedantie is 3700 keer groter dan die van lucht) gebruikt als koppelingsmedium tussen de zender, het proefstuk en de ontvanger. Wanneer een geluidsgolf een grens tussen twee materialen bereikt, bepaalt het verschil in akoestische impedantie of de golf doorgelaten of weerkaatst wordt. Hierdoor is het mogelijk om vreemde objecten of luchtinsluitels waar te nemen in het proefstuk.

Een gekende ultrasone geluidsgolf wordt door de zender-ontvanger uitgezonden richting het proefstuk. Een deel van de golf wordt doorgelaten en kan opgevangen worden door de ontvanger aan de andere kant van het proefstuk. Een ander deel van de golf wordt weerkaatst en terug opgevangen door de zender-ontvanger. Aangezien zowel het gereflecteerde als het doorgelaten signaal waardevolle en verschillende informatie bevatten en indien men enkel wil werken met een enkele zender-ontvanger, wordt in sommige gevallen een spiegel onder het proefstuk geplaatst waardoor het signaal terug door het proefstuk gaat en enkel opgenomen wordt door de zender.

Aangezien de voortplantingssnelheid van de geluidsgolf gekend is, kan uit het tijdsinterval van de gereflecteerde geluidsgolf voor de boven- en onderkant van het proefstuk de dikte van het proefstuk bepaald worden. Elke reflectie tussen deze beiden stelt een beschadiging in het composietmateriaal voor. Kleine luchtinsluitels veroorzaken geen reflectie van het signaal, maar worden geabsorbeerd. Deze gebieden kunnen bepaald worden uit de analyse van het doorgelaten signaal.

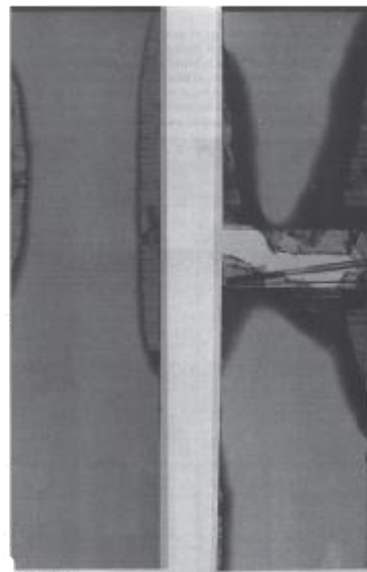


De voorstelling van het volledige signaal in functie van de tijd is gekend als een A-scan. Deze geeft enkel informatie voor één punt op het oppervlak van het proefstuk. In de meeste gevallen wordt het volledige oppervlak gescand. Een C-scan geeft de informatie weer van een A-scan over het volledige traject langs het oppervlak van het proefstuk. De B- en D-scan geven de informatie weer van de A-scan in de dikterichting van het proefstuk.



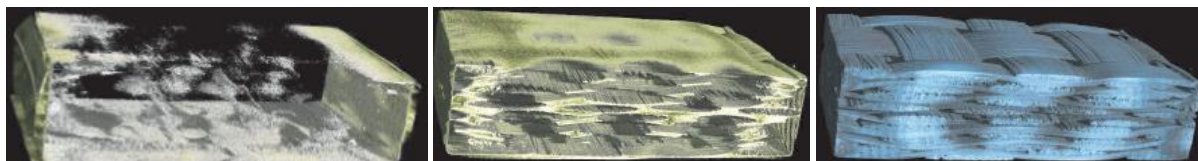
Radiografie

In proeven die gebruik maken van radiografie, wordt het proefstuk bestraald met elektromagnetische stralen met een korte golflengte, waardoor een 2D-beeld van het composiet wordt weergegeven. Hiervoor wordt vaak gebruik gemaakt van röntgenstralen. Met deze techniek kunnen zowel veranderingen in de dikte als veranderingen in het materiaal waargenomen worden door de verschillende absorptie van de stralen. In veel gevallen wordt gebruik gemaakt van een penetratievloeistof met een hoge absorptie voor de straling, zodat een beeld met een hoger contrast kan verkregen worden. Hierop zijn de gebreken, zoals scheuren in het laminaat, duidelijk zichtbaar.



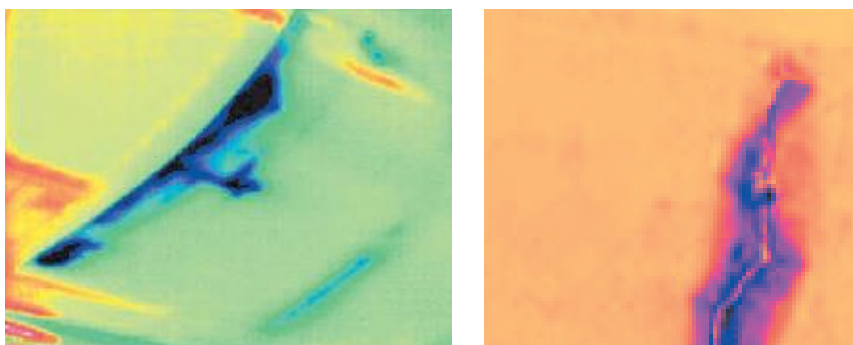
Tomografie

De tomografietechniek, ook gekend als CT-scanning, maakt zoals de radiografie gebruik van röntgenstralen om een groot aantal doorsnedes van een 3D-object te maken. Deze beelden kunnen nadien samengevoegd worden met specifieke software om een virtueel 3D-model te bekomen van het object. Op basis van het verschil in absorptie van de straling kunnen opnieuw de verschillende bestanddelen in het object onderscheiden worden. In het virtueel model kunnen materialen met dezelfde mate van absorptie van de straling onderscheiden worden, kunnen bepaalde delen van het model verwijderd worden, en kan het model omgezet worden in een reeks van segmenten of doorsnedes langs een gedefinieerd pad.



Thermografie

Bij de thermografietechniek wordt de temperatuurgradiënt over de structuur opgemeten om de aanwezige beschadiging in de structuur terug te vinden. Hierbij wordt het warmtetransport beïnvloed door aanwezige schade of kan door interne frictie van twee separate delen warmte ontwikkeld worden, welke tevens zichtbaar is via de warmtecamera. In het eerste geval dient de warmte zelf opgewekt en toegevoegd te worden aan de structuur. Hierbij kan warmte opgewekt worden door een laserpuls, door microgolven of een Eddyroom ten gevolge van magnetische velden.



Akoestische emissie

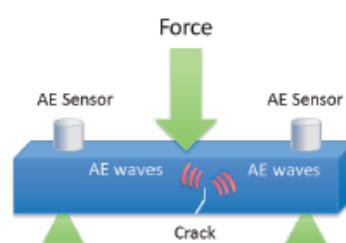
Bij belastingen ver onder de uiterste sterkte van het laminaat ontstaan reeds microscheuren in het laminaat. Elke scheur resulteert in een lokale verandering van de spanningstoestand in het laminaat, waardoor een korte elastische vibratie en daaruitvolgend een akoestische emissie ontstaat. Grotere scheuren genereren een hoorbaar geluid, terwijl microscheuren enkel met behulp van specifieke

akoestische-emissiesensoren kunnen waargenomen worden. Het nadeel van deze techniek is dat bestaande scheuren in het laminaat niet waargenomen worden en dat deze techniek enkel gebruikt kan worden gedurende een (destructieve) test. Deze techniek is echter wel interessant om vermoeiing in een structuur te onderzoeken.

De akoestische emissie van een matrixscheur verschilt van deze van een vezelbreuk, maar het verschil is moeilijk detecteerbaar, aangezien het geluid enige afstand moet afleggen door het materiaal alvorens het de sensor bereikt. Hierdoor is het met deze techniek enkel mogelijk om de scheurgroei in de structuur vast te leggen, maar is het moeilijk om het verschil in het breukmechanisme vast te leggen. Andere elementen die detectie bemoeilijken zijn:

- Het geluid wordt gedempt in de structuur;
- Er ontstaat een spreiding en reflectie van het geluid in de structuur;
- De eigenschappen van de gebruikte sensor hebben een invloed op de gevoeligheid;
- Andere geluiden die ontstaan in de structuur (bv. wrijving, geluid van de testopstelling).

Om de precieze oorsprong van het geluid te bepalen, zijn verschillende sensoren over de structuur noodzakelijk. Door gebruik te maken van het tijdsverschil voor eenzelfde signaal tussen twee sensoren, kan de locatie van de scheur ingeschat worden. Hierbij dient rekening gehouden te worden met het feit dat het signaal verandert in functie van de afgelegde afstand door de structuur.



1.9 Vermoeiing

Wisselende belastingen kunnen, mits ze vaak genoeg herhaald worden, op de langere duur tot schade leiden. Vermoeiing treedt bij veel materialen op. Over vermoeiing van staal is vrij veel bekend. Hier ontstaat, meestal bij een kerf, een scheurtje, dat onder invloed van de wisselende belastingen langzaam verder groeit, tot het een kritische lengte heeft bereikt en de constructie bezwijkt. Over vermoeiing bij composieten is wat minder bekend, maar het is wel duidelijk dat het faalmechanisme heel anders is dan bij staal. Een belangrijk verschil is het aantal vermoeiingsscheurtjes dat gelijktijdig kan optreden in een laminaat. Dat is veel groter dan in een vergelijkbare staalconstructie. Deze scheurtjes kunnen in verschillende richtingen ontstaan en groeien, en in elkaar vloeien tot grotere scheuren en delaminaties.

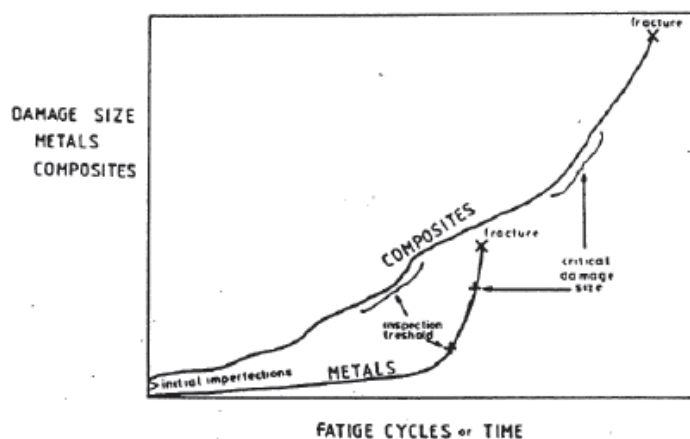
Het feit dat er veel, soms samenwerkende, faalmechanismen optreden tijdens vermoeiing wil niet zeggen dat composieten slechter presteren op het vlak van vermoeiing. Door een goed ontwerp kan het materiaal grotere vermoeiingsbelastingen aan, dat zich vertaalt in de helling van de S-N curve. Deze curve is bij composieten over het algemeen vlakker dan bij staal, wat wil zeggen dat bij een verlaging van de spanning een grotere toename in levensduur optreedt. Composietmaterialen hebben bij lage spanningen dan ook een zeer hoge vermoeiingslevensduur.

Een ander belangrijk verschil met traditionele bouwmaterialen zoals beton en staal is dat composietmaterialen onder invloed van vermoeiing een deel van hun stijfheid verliezen. Het stijfheidsverlies wordt hierbij groter naarmate er meer vezels niet in de belastingrichting liggen. Bij vermoeiingsbelastingen met een middelmatige trek- of drukspanning kan tevens kruip (bij een constante belasting) of spanningsrelaxatie (bij een externe voorspanning of constante verplaatsing) optreden.

Het optreden van vermoeiingsschade kan worden verminderd door materialen en vezeloriëntaties aan te passen aan de belasting, de constructie zodanig te wijzigen dat de belasting gunstiger wordt, of de spanning in de constructie te verlagen door extra lagen toe te voegen. Bij het beoordelen van de vermoeiingsgevoeligheid moeten met name verbindingen en details kritisch bekeken en vaak getest worden.

Vermoeiingsontwerp

Het vermoeiingsgedrag van composieten is complexer dan dat van metalen door de schade die erin optreedt en de reductie van de stijfheid gedurende de vermoeiingslevensduur van de composieten structuur, maar door de herverdeling van de spanningen in het laminaat blijft de structurele integriteit bewaard. De meeste vermoeiingsmodellen zijn gelimiteerd tot het gebruik en de interpolatie van de S-N-curves en negeren de voordelige invloed van de herverdeling van de spanningen in de laminaten. Hierdoor worden in het ontwerp grote veiligheidsfactoren (8 tot 10) gebruikt en zijn dure en tijdrovende vermoeiingsproeven noodzakelijk.

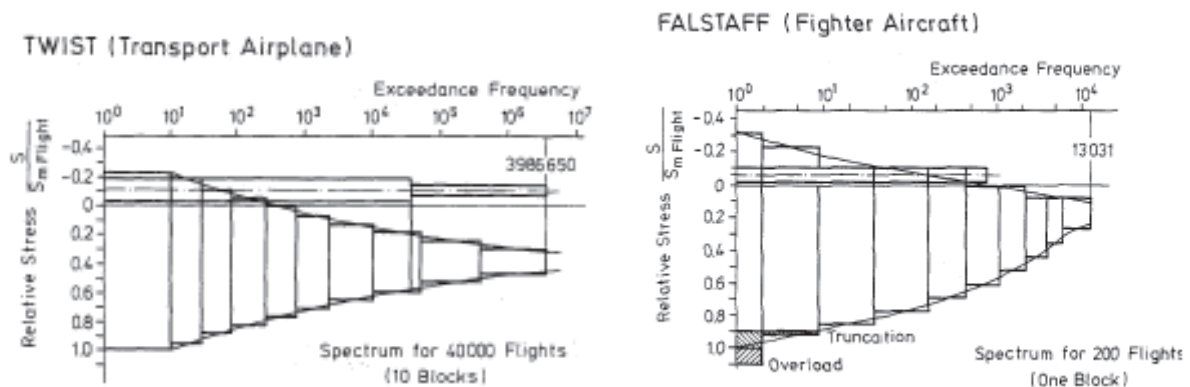


Verschillende S-N-curves worden gegroepeerd in een constant-life diagram, waaruit de invloed van de gemiddelde spanningen en de R-waarde bepaald kunnen worden. Voor het ontwerp van composietstructuren bevatten de opgestelde S-N-curves enkele nadelen, zo:

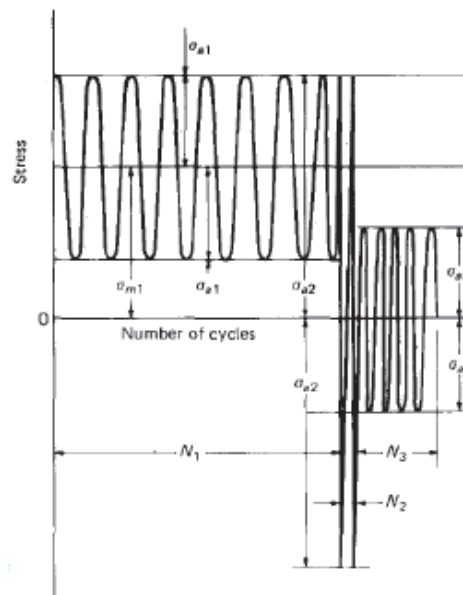
- Bevatten ze geen enkele informatie in verband met het type bezwijkmechanisme;
- Bevatten ze geen voorspelling van de stijfheidsreductie die aanwezig is bij composieten;
- Zijn ze enkel gebaseerd op experimenten en niet op (analytische of eindige-elementen) modellen;
- Zijn ze in de meeste gevallen enkel toepasbaar voor uni-axiale belastingen op de proefstukken;
- Zijn steeds nieuwe experimenten noodzakelijk indien de laagopbouw of het materiaal veranderd wordt.

In de meeste toepassingen variëren de maximale, de minimale en de gemiddelde spanningen, de R-waarde en zelfs de frequentie en de richting van de belasting in de tijd. Het reële spectrum van de belasting is vaak niet gekend en is verschillend voor de verschillende gebieden waarin composietstructuren worden gebruikt. Bij het ontwerp zijn hierdoor twee mogelijkheden:

1. Door gebruik te maken van gestandaardiseerde belastingsreeksen. Hierna volgen enkele voorbeelden van belastingsreeksen die gebruikt worden in het ontwerp.
 - a. TWIST (Transport Wing Standard): vermoeiingsbelasting voor de verbinding tussen de vleugels en de romp van een transportvliegtuig, zoals hieronder links weergegeven;
 - b. FALSTAFF (Fighter Aircraft Load Standard For Fatigue Evaluation): vermoeiingsbelasting voor de verbinding tussen de vleugel en de romp van een gevechtsvliegtuig, zoals hieronder rechts weergegeven;
 - c. HELIX voor componenten in een helikopter die onderworpen zijn aan een dynamische belasting;
 - d. WISPER (WInd SPEctrum Reference) voor de windbelasting op een windturbineblad.



2. Door gebruik te maken van de accumulatieregels (Regel van Miner) voor constante-amplitudetesten. Om een realistische belasting te simuleren, worden testen uitgevoerd met verschillende belastingsblokken, met elk een eigen gemiddelde spanning en spanningsamplitude. Gedurende een vermoeiingsbelasting met een constante amplitude neemt de schade D lineair toe gedurende de levensduur, startende bij 0 tot 1 bij falen.



Deze regel wordt vaak toegepast, maar de geschatte levensduur overstijgt in vele gevallen de werkelijke levensduur, aangezien een lineaire schadegroei aangenomen wordt. Hierdoor is deze techniek onveilig voor het vermoeiingsontwerp van dragende composietstructuren. Verder neemt de regel van Miner de volgorde van de belastingsblokken niet in rekening, terwijl voor composietmaterialen de vermoeiingslevensduur voor lage amplitudes significant verschillend is van deze voor hoge amplitudes. Als laatste beschouwt de regel geen interacties tussen de mate van belasting en de schade.

1.10 Impactbelasting

Wanneer impact een mogelijk belastingsgeval is voor het ontwerp, dan moet men er rekening mee houden dat composieten de eigenschap hebben dat impactschade moeilijk te detecteren kan zijn wegens het elastische materiaalgedrag. De ernst van de schade is niet altijd aan de toestand van het geraakte oppervlak af te lezen. Waar bij metalen bijvoorbeeld een duidelijke deuk ontstaat, veert een laminaat voor een groot deel terug, zelfs als er veel scheuren en delaminaties dieper in het laminaat zijn ontstaan. Dit betekent voor het ontwerp dat bij de planning van inspectie, onderhoud en eventuele reparatie, rekening gehouden moet worden met toegankelijkheid van beide zijden van het laminaat.

Dit betekent ook dat bij het ontwerp voor functioneren bij aanwezigheid van impactschade, rekening met de grootte van de schade moet worden gehouden.

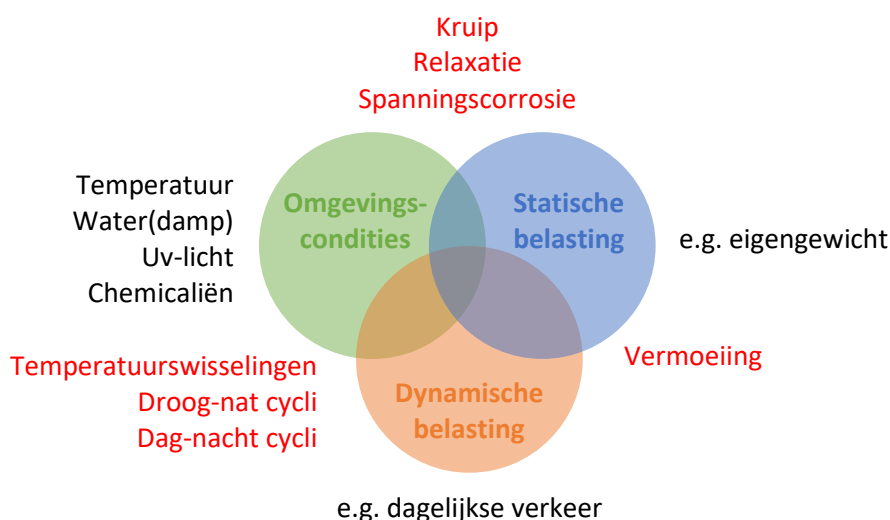
1.11 Kruip en spanningsrelaxatie

Als men een constante belasting aan een metalen staaf hangt, rekt deze elastisch uit en verandert daarna niet meer van vorm. Bij de meeste kunststoffen en sommige andere materialen wordt zo'n staaf echter steeds langer en kan ze uiteindelijk breken. Kruip(breuk), zoals dit verschijnsel genoemd wordt, treedt ook op onder drukspanningen waarbij de extern opgelegde voorspanningen verkleind worden, waardoor de spanning in het materiaal kleiner wordt. In dit geval spreekt men van spanningsrelaxatie. Glasvezels en de meeste koolstofvezels zijn nauwelijks gevoelig voor kruip. Aramidevezels zijn daarentegen kruipgevoelig, net als de meeste harsen. De effecten van kruip kunnen verminderd worden door de juiste materiaalkeuze en door er bij het ontwerp rekening mee te houden.

In de meeste composieten waarbij de vezels de belasting dragen en het hars 'ontlasten', treedt weinig kruip op. Dit zijn bijvoorbeeld UD-laminaten. Bij laminaten en constructies waarbij het hars een groot deel van de belasting opneemt (laminaten met vezels niet in de belastingsrichting, verlijmingen, belasting uit het vlak, etc.), moet rekening gehouden worden met de effecten van kruip. Hogere temperaturen of aantasting van het materiaal door omgevingsinvloeden hebben grote invloed op het kruptgedrag. Dit wordt toegeschreven aan breuk van de zwakke vezels, waarna de belasting op de overige vezels wordt overgedragen aan de hand van de schuifspanning in het matrixmateriaal. Deze schuifspanning is aan herverdeling onderhevig door kruip, waardoor een kettingreactie van vezelbreuk kan ontstaan.

1.12 Duurzaamheid (Durability)

De duurzaamheid van een materiaal of een constructie wordt gedefinieerd als het vermogen om zijn oorspronkelijke eigenschappen te behouden met het verstrijken van de tijd onder een bepaalde belasting. De duurzaamheid van een materiaal kan aangetast worden door enerzijds externe en anderzijds interne parameters. Onder externe parameters, die de degradatie van de duurzaamheid van het materiaal veroorzaken, worden de omgevingscondities (e.g. temperatuur, water(damp), uv-licht, chemicaliën) en statische (e.g. eigengewicht) en dynamische belasting (e.g. dagelijkse verkeer) op de structuur verstaan. Ook een combinatie van twee parameters is mogelijk zoals bijvoorbeeld kruip, vermoeiing en temperatuurswisselingen. Een overzicht van de verschillende externe parameters wordt in de onderstaande figuur weergegeven.

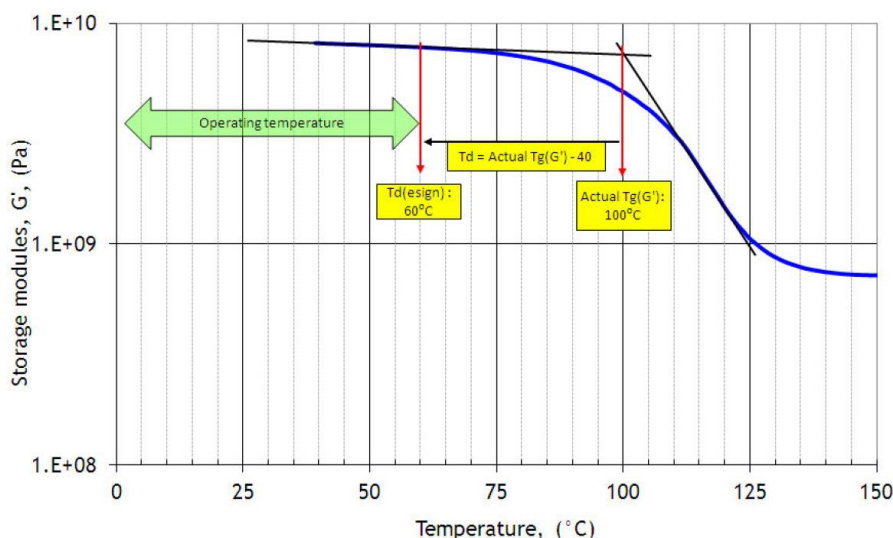


De interne parameters betreffen de degradatie van één of meerdere componenten van het composiet zoals cohesieve breuk in het hars of vezelonthechting bij respectievelijk een goede en slechte adhesie tussen het hars en de vezels. Om het laatste schadefenomeen van adhesieve breuk tussen de vezel(s)

en het hars te voorkomen is een goede sizing van de vezels ten opzichte van het gebruikte hars van belang. De sizing van de vezels zorgt enerzijds voor een goede bevochtiging van het vezeloppervlak en anderzijds voor een chemische en fysische interactie tussen het vezeloppervlak en het uitgeharde hars. Daarnaast beschermt de sizing ook de vezels, voorkomt het breuk en pluisvorming en verbetert het de verwerkbaarheid van de rovings tijdens de productie. De interne duurzaamheidsparameters van het composiet zijn in grote mate afhankelijk van de productiekwaliteit van de constructie, zoals de uitharding van het hars, de verdichting van de vezels en de aanhechting van het hars aan de vezels.

1.12.1 Temperatuurdegradatie

De temperatuur veroorzaakt geen of weinig degradatie op de materiaaleigenschappen van anorganische vezels zoals glas en koolstof. De grootste degradatie in een composiet onder invloed van de temperatuur kan gezien worden bij het hars. Hierbij heeft de temperatuur voornamelijk effect op de vezel-hars interface, aangezien de interface en het hars een visco-elastisch gedrag vertonen, die bij een toename van de temperatuur leidt tot een verzachting van het materiaal. Vanaf een bepaalde temperatuur zal het hars overgaan van een glasachtige vaste fase naar een rubberachtige fase met aanzienlijke reductie op de stijfheid en sterkte van het materiaal tot gevolg. De temperatuur waarbij deze transitie in materiaaleigenschappen plaatsvindt, wordt de glastransitietemperatuur van het hars genoemd.



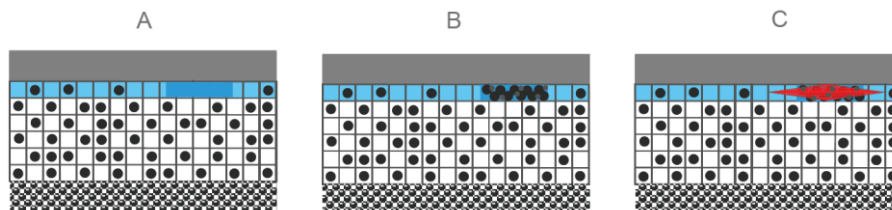
De bovenstaande figuur geeft een grafische weergave van de evolutie van de glijdingsmodulus van een hars bij een toenemende temperatuur. Het temperatuurbereik waarbij de transitie van glasachtige naar rubberachtige toestand voor dit hars plaatsvindt ligt tussen 65°C en 145°C. De glastransitietemperatuur T_g van het hars wordt bepaald als het snijpunt van de raaklijn aan de degradatie van de glijdingsmodulus van het hars bij gebruikstemperaturen en de raaklijn aan de overgang naar rubberachtige toestand.

In het ontwerp van een composietstructuur wordt de temperatuur in rekening gebracht aan de hand van de glastransitietemperatuur van het gebruikte hars. Zo wordt de stijfheid van het composietmateriaal aan de hand van conversiefactoren gereduceerd met 10% indien de ontwerptemperatuur T_d gelegen is tussen $T_g - 40^\circ\text{C}$ en $T_g - 20^\circ\text{C}$. De sterkte wordt tevens gereduceerd met 10% om de effecten van de temperatuur in rekening te brengen in het ontwerp.

1.12.2 Degradatie door water(damp)

De opname van water(damp) in het hars van een composiet gebeurt volgens de wetten van Fick, waarbij de flux, in dit geval water(damp), zich verplaatst van gebieden met een hoge concentratie naar gebieden met een lage concentratie, met een snelheid die evenredig is aan de concentratiegradiënt (ruimtelijke afgeleide). Watermoleculen zullen zich na verloop van tijd infiltreren in de het hars van

het composiet, wat tot een zekere procentuele massatoename van het composiet zal leiden. De geabsorbeerde watermoleculen zorgen voor een plasticering van de uitgeharde harsmatrix door het toedoen van hydrolyse. Dit proces is echter bij uitdroging van het composiet terug omkeerbaar.



Degradatie van de matrix: watermoleculen hopen zich op in de holtes van de matrix of ontstaan als gevolg van hydrolyse van polymere hoofdketens. Moleculen met een laag moleculair gewicht lossen op in de ontstane waterrijke omgeving (A). Als gevolg ontstaat er een osmotische druk in het matrixmateriaal (B) en kunnen delaminaties bij een te hoge osmotische druk ontstaan in het composiet (C)

Degradatie van de vezel-harsinterface: watermoleculen stapelen zich op ter hoogte van de vezel-harsinterface als gevolg van slechte bevochtiging van het vezeloppervlak door het matrixmateriaal. Moleculen met een laag moleculair gewicht lossen op in de waterige omgeving en er ontstaat tevens hydrolyse van de matrixmoleculen. Er ontwikkelt zich een osmotische druk in de interface, die bij een te grote waarde leidt tot delaminatie van de interface.

In het ontwerp wordt de osmotische delaminatie van een composiet in een vochtige omgeving opgenomen onder de vorm van conversiefactoren. Indien de structuur continu blootgesteld wordt aan water(damp), dient een reductie van 30% doorgevoerd te worden op de stijfheid en de sterkte van het composiet. Bij variërende omgevingscondities met afwisselende droge en natte periodes, dient de stijfheid en sterkte met 10% gereduceerd te worden. In een continu droge omgeving worden de stijfheid en sterkte van het composietmateriaal niet gereduceerd in het ontwerp.

1.12.3 Uv-degradatie

Uv-licht degradeert voornamelijk het oppervlak van het composiet. Door het toedoen van foto-oxidatie in aanwezigheid van zuurstof treedt er oppervlakte-oxidatie van het composiet op onder de vorm van een vergeling. De foto-oxidatie resulteert in een verbrossing van het oppervlak met microscheuren in de matrix als gevolg. Glas- en koolstofvezels zijn ongevoelig voor uv-degradatie, terwijl er bij aramidevezels een zekere reductie van de mechanische eigenschappen optreedt bij de langdurige blootstelling aan het uv-licht.

Uv-degradatie op zich is ongevaarlijk voor de duurzaamheid van het composiet. Echter kan bij wisselende periodes van droogte, vochtigheid en bezonning een synergie ontstaan, waardoor een versnelde degradatie van het harsmateriaal optreedt door een combinatie van foto-oxidatie en hydrolyse, zoals in het bovenstaande onderdeel besproken.

De uv-weerstand van het GVVK materiaal kan verbeterd worden door het toevoegen van uv-stabilisators aan het hars, het voorzien van een opofferingslaag (gelcoat of topcoat), een uv-bestendige verf (polyurethaan coating) en/of het gebruiken van uv-bestendige hars(en).

1.13 Duurzaamheid (Sustainability)

Sustainability in het algemeen, en ook van composieten, is een actueel gespreksthem. Het kwantificeren van de milieubelasting van constructies is een nieuw en ingewikkeld vakgebied. Dit hoofdstuk gaat globaal in op de milieu-impact van composieten en composietconstructies en geeft handvaten voor verdere studie. Een belangrijke boodschap is dat elke constructie, óók voor wat betreft milieu-impact, beschouwd moet worden over haar gehele levensduur.

Het is voor opdrachtgevers en voor producenten interessant om vergelijkingen te maken van de prestaties van een product op basis van milieu-impact. Life cycle analysis of LCA is de verzamelnaam

voor methoden waarmee de milieu-impact van constructies in kaart wordt gebracht. Hierbij worden drie levensfasen onderscheiden: productie, gebruik en levenseinde.

De methode ontrafelt een constructie in haar onderdelen, bepaalt per onderdeel hoeveel materiaal, energie en water er wordt geconsumeerd en wat de eventuele uitstoot van schadelijke stoffen is. Dit gaat heel ver. Voor een metalen onderdeel moet immers ijzererts gewonnen en getransporteerd worden en moeten machines en personeel ingezet worden, wat integraal wordt meegenomen in een dergelijke analyse. Tijdens gebruik moet een constructie vaak geïnspecteerd en onderhouden worden. Ook dit kost energie en gaat vaak gepaard met uitstoot van schadelijke stoffen. Een constructie heeft een bepaalde levensduur. Wanneer het einde daarvan bereikt is, moet een (her)bestemming worden gevonden voor de materialen in de constructie.

Het resultaat van een LCA kan op verschillende wijzen worden uitgedrukt. Er bestaat een scala aan impact-indicatoren. De invloed van een fase wordt bijvoorbeeld uitgedrukt in ton CO₂, energieverbruik of in samengestelde indicatoren zoals de Eco- of MKI-score.

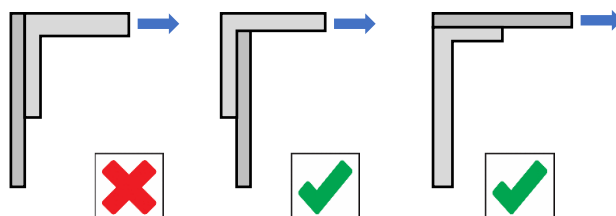
De aannames die gepaard gaan met een LCA zijn een bron van discussie. Voor een nieuwe en diverse verzameling materialen als composieten is de beschikbare kennis van de milieu-impact in veel gevallen relatief beperkt. Met name in de productiefase en eindelevensfase is er de nodige discussie over de milieuvriendelijkheid van composieten.

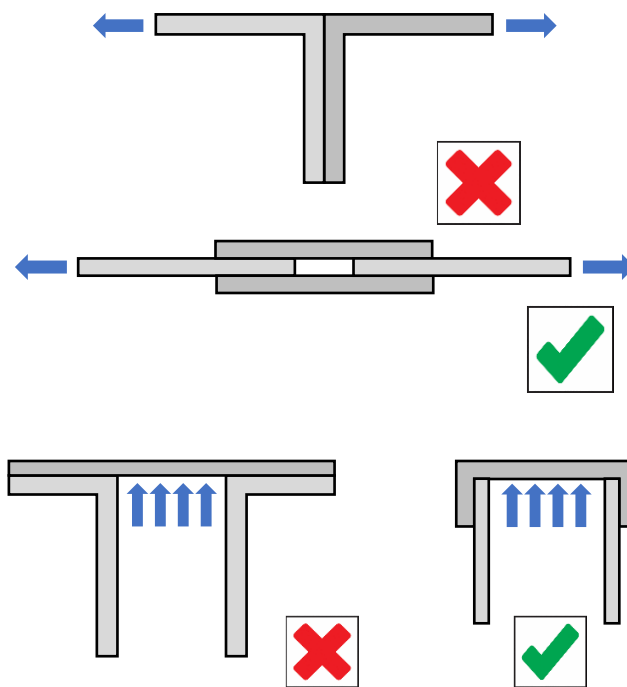
1.14 Verbindingen

Composietdelen moeten vaak aan constructiedelen verbonden worden die gemaakt zijn van een ander materiaal. Daarnaast kan het voorkomen dat composietdelen aan elkaar verbonden moeten worden. In het algemeen is het eerste vaak onvermijdelijk, maar heeft het de voorkeur het laatste te vermijden, omdat het de composietconstructie ingewikkelder, zwaarder en duurder maakt dan wanneer een integrale constructie (zonder verbindingen) wordt gemaakt. Bij vrijwel alle verbindingen is nu eenmaal sprake van het onderbreken van vezels, waardoor de in de constructie optredende spanningen via de verbinding moeten worden overgebracht. In deze sectie wordt een onderscheid gemaakt tussen drie types verbindingen, namelijk de lijmverbinding, de mechanische verbinding en de lasverbinding.

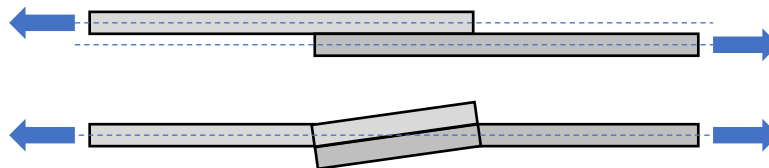
1.14.1 Lijmverbindingen

Een goede lijmverbinding is afhankelijk van een goede voorbereiding en ontwerp. Ten eerste wordt de kwaliteit van de lijmverbinding bepaald door goed vakmanschap: voorbehandeling (reinigen en eventueel schuren) van de te lijmen objecten, en op de juiste wijze en onder juiste condities (temperatuur en vocht) aanbrengen van de lijm. Verder is een goede lijmverbinding zo ontworpen dat de lijm hoofdzakelijk op afschuiving wordt belast. De treksterkte van een lijmverbinding is in het algemeen lager dan de afschuifsterkte. Afpelspanningen (spanningen loodrecht op de lijmverbinding die de treksterkte aanspreken) moeten dus voorkomen worden. Hierna volgen enkele voorbeelden van verschillende types lijmverbinding en is aangeduid hoe een goede en slechte lijmverbinding is ontworpen.

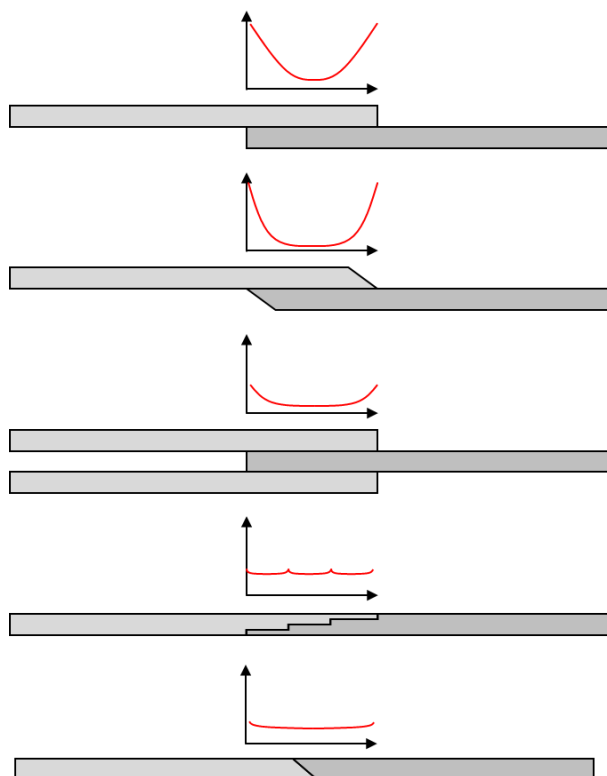




Een goede lijmverbinding is op grond van bovenstaande parallel aan en symmetrisch ten opzichte van de werklijn van de op de lijmverbinding werkende krachten (vermijden van excentriciteit). Hierbij moet rekening gehouden worden met vervorming, zie de volgende figuur. Uit deze figuur blijkt dat afspansingen onder andere kunnen ontstaan door secundaire buiging van de constructie.



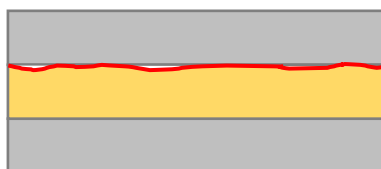
Ter plaatse van de randen van een lijmverbinding heersen vaak piekspanningen door de stijfheidsovergangen van constructiedeel naar lijm, zie onderstaande figuur. Deze stijfheidsovergangen kunnen gereduceerd worden door de stijfheid van de lijm en het laminaat zo dicht mogelijk bij elkaar te ontwerpen (bijvoorbeeld, door een stijvere lijm te gebruiken en/of de vezelrichting van de te verlijmen lamellen aan te passen). Overigens heeft een flexibele lijm als voordeel dat piekspanningen sneller herverdeeld worden; dit werkt tegengesteld aan het kiezen van een stijve lijm die de lamelstijfheid benadert. Spanningsconcentraties ontstaan ook doordat een lijmverbinding vaak gepaard gaat met een geometrische overgang. Hoe lager de afschuifspanning in de lijm, des te lager zijn ook de piekspanningen, want zij zijn evenredig met de gemiddelde spanning. Hoe groter de lijmoppervlakte, des te beter.



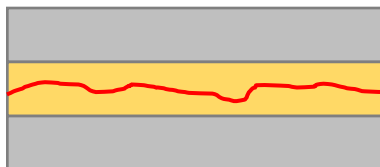
Een lijmlaag is over het algemeen een fractie van een millimeter dun. In grote constructies (bruggen, windturbinebladen) wordt regelmatig gebruik gemaakt van dikkere lijmlagen, tot enkele millimeters dik. Het gedrag van een lijmvverbinding is afhankelijk van de lijmdikte. Een dikkere lijmlaag kan spanningsconcentraties beter intern verdelen, maar maakt de constructie wel slapper dan een dunne lijmlaag. Een dikke lijmlaag is ook moeilijker aan te brengen, omdat de lijm sneller uitvloeit. Voor dikke lijmlagen wordt dan ook vaak een vulmiddel aan de lijm toegevoegd (bijvoorbeeld zeer korte glasvezels). Dan wordt de lijm aangeduid als bindpasta (bonding paste).

Een lijmvverbinding kan door te hoge spanningen of slecht ontwerp falen. Het faalmechanisme kan een hulpmiddel zijn bij het vinden van de oorzaak. Bij het falen van een lijmvverbinding wordt onderscheid gemaakt tussen adhesief en cohesief falen.

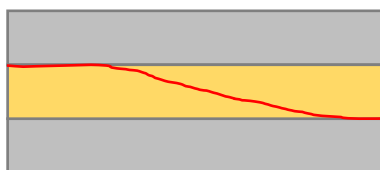
Bij adhesief falen treedt bezwijken op ter plaatse van de verbinding tussen de lijm en het te lijmen onderdeel. Adhesief falen kan voorkomen worden door een goede voorbehandeling (schoon- en droogmaken, ontvetten). Ook door te zorgen dat de onderdelen een juiste ruwheid hebben, kan adhesieve breuk voorkomen worden. Een hogere oppervlakteruwheid zorgt voor een groter contactoppervlak, hoewel luchtinsluitels kunnen ontstaan wanneer de ruwheid te groot is. Verder komt adhesief falen minder snel voor als de te lijmen delen poreus zijn door een verankering van de lijm in de poriën.



Een cohesieve breuk treedt op in de lijm. De cohesiesterkte wordt bepaald door het type lijm, de eventuele uithardingskrim, de porositeit van de lijmlaag door het verdampende oplosmiddel (bij lijmen met oplosmiddel), en de homogeniteit en juiste verhouding van de componenten (bij tweecomponentenlijmen).



Als bij bezwijken van een lijmverbinding één van de constructieonderdelen geen of weinig lijmresten vertoont, is sprake van adhesieve breuk, en moet nagegaan worden of de voorbehandeling juist is uitgevoerd en of de lijm geschikt is voor het te lijmen onderdeel. Cohesieve breuk geeft aan dat de lijm zelf zwakker was dan de verbinding tussen lijm en constructie-onderdeel. Overigens treedt regelmatig ook een mengvorm van deze bezwijkwijzen op. Bij breuk van een lapnaad ziet men ook vaak de blootgelegde vezels van een lamel. Dan is in feite adhesieve breuk tussen matrixmateriaal en vezelversterking opgetreden. In dat geval is er weinig aan de lijmverbinding zelf te verbeteren.



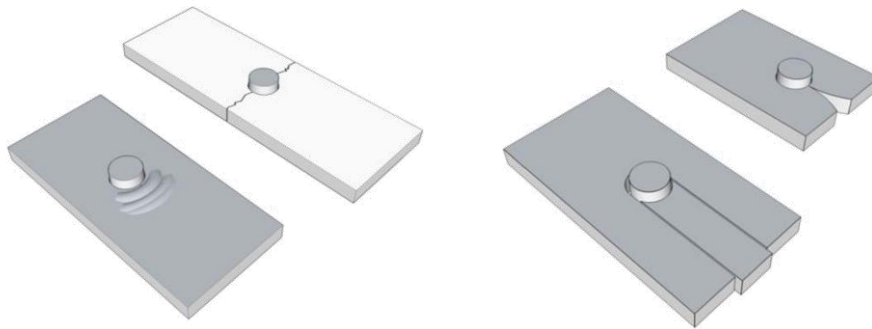
1.14.2 Mechanische verbindingen

Mechanische verbindingen zijn doorgaans van het verbindingstype 'pen-gat'. Het maken van gaten in een composietconstructie blijft niet zonder gevolgen aangezien de vezels hierdoor onderbroken worden en er delaminaties ten gevolge van de boring kunnen ontstaan tussen de lagen van het laminaat.

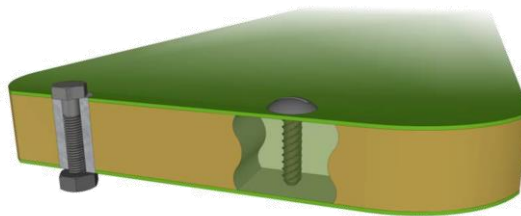
Bij een pen-gatverbinding die in het vlak van het laminaat wordt belast, rust de pen (dit kan een (klink)nagel, paspen, of bout zijn) tegen de gatrand en oefent hier een druk op uit: de stuikdruk. Schroefdraad die tegen een gatrand rust, beschadigt de gatrand ook. De stuikdruk is afhankelijk van de passing, laminaatopbouw en evt. zijdelingse ondersteuning van de gatrand (bijvoorbeeld door sluitringen). Naast stuikdruk treedt in het laminaat, in de nettodoorsnede (de spanningsdoorsnede minus oppervlak van het gat), aan weerszijden van het gat een spanningsconcentratie op. Deze wordt gekwantificeerd met een spanningsconcentratiefactor. Dit is de factor waarmee men de spanning in de resterende doorsnede moet vermenigvuldigen. Bij metalen ligt deze factor tussen de 2 en 4. Bij composieten kan deze factor hoger liggen: tussen de 1,5 en 7. Dit komt doordat metalen bij de gatrand plastisch vervormen, waardoor de rekken wel verder oplopen, maar de spanningen in het materiaal niet. Dit plastisch gedrag komt bij composieten nauwelijks voor.

Voor boutverbindingen in composietmaterialen kunnen de volgende karakteristieke breukvormen teruggevonden worden:

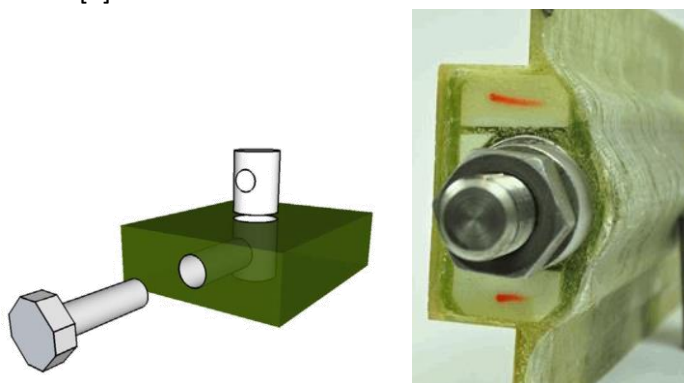
- Trekbreek in de nettodoorsnede ten gevolge van de spanningsconcentratie;
- Bezwijken op stuikdruk. Dit is de meest gewenste breukvorm (het meest vergevingsgezind). De sterkte kan worden opgevoerd door het laminaat in de dikterichting te ondersteunen. Hiervoor kunnen sluitringen worden gebruikt;
- Vermoeiingsbreuk. In het contactvlak tussen bout en gat bezwijken de vezels zeer lokaal op druk. Hierdoor gaat de boutpassing gedeeltelijk verloren en treedt herverdeling van de belasting over de boutverbinding op;
- Afschuifbreuk. Deze breukvorm kan worden voorkomen door de randafstand te vergroten en vezels in de $\pm 45^\circ$ -richtingen toe te voegen;
- Kruip. De voorspanning in een bout kan door spanningsrelaxatie in het laminaat afnemen, hetgeen een negatieve invloed op de kwaliteit van de verbinding kan hebben.



Voor diverse verbindingen kan het zin hebben een stuk metaal, hout, of composiet in (één van) de te verbinden onderdelen te bevestigen, in het algemeen gebeurt dit om spanningen, die door een bout/schroef ingeleid worden, beter te kunnen verdelen. Zulke inserts komen bij laminaten voor, maar zijn met name vaak nodig bij sandwichlaminaten. Zo'n insert is dan meestal in het laminaat of sandwich ingebouwd tijdens de vervaardiging van het te verbinden deel, of later verlijmd.



- Voor vezelversterkte kunststoffen kan, net als voor hout en zachte materialen, een **schroefverbinding** worden gemaakt, waarbij de spoed en draadhoogte vrij hoog zijn. De sterkte en demonteerbaarheid van een dergelijke verbinding kan aanmerkelijk verbeterd worden door het gebruik van inserts.
- Een **boutverbinding** (en eventueel sluitring) heeft als voordeel dat de verbinding terug uit elkaar gehaald kan worden. Bouten worden meestal loodrecht op het vlak aangebracht in laminaten, maar bij dikke laminaten is het ook mogelijk een verbinding in het laminaatvlak aan te brengen door gebruik te maken van T-bouten of inserts. Een T-bout is schematisch weergegeven in de volgende figuur. Voor de T-bout moeten twee gaten in het laminaat worden geboord: één in het vlak van het laminaat, voor de draad; en één loodrecht op het laminaat, voor de moer [1].

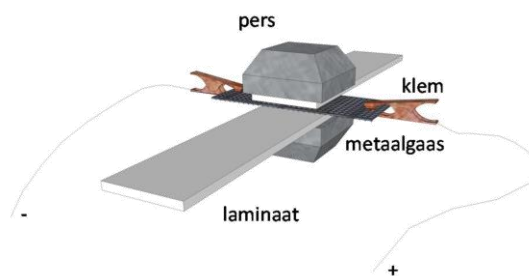


- Een combinatie van een lijmverbinding en een mechanische verbinding is ook mogelijk, een verbinding die soms als hybride wordt aangeduid. De mechanische verbinding verzorgt hierbij

de aandrukkraft voor de lijm, waardoor soms ook de productietijd verkort kan worden. Ook kan de lijm fabricagetoleranties opvangen of de verbinding vloeistof- of gasdicht maken.

1.14.3 Lasverbinding

Composietmaterialen waarbij thermoplasten gebruikt worden kunnen in plaats van door lijmen ook verbonden worden door de lasbaarheid van thermoplastische kunststoffen. Ter plaatse kunnen de te verbinden onderdelen worden verhit, zodat het kunststof smelt. Door fixeren en laten stollen van de kunststof worden de delen dan verlijmd. Het lokaal verhitten van thermoplasten wordt op allerlei manieren gedaan. Zo kan verhitting gebeuren met infrarood licht, microgolven en weerstanden of door inductielassen. In de laatste twee gevallen wordt een strip metaalgaas in de te verbinden delen verwerkt.



2 TERREINVERKENNING

In een tweede deel van dit werkpakket werd de state-of-the-art van bestaande composiettoepassingen in de bruggenbouw in kaart gebracht aan de hand van een uitgebreid literatuuronderzoek waarin bestaande binnen- en buitenlandse systemen en concepten gebundeld worden. Naast de informatie uit de literatuur, werd ook de informatie van bedrijven meegenomen, evenals de eerste ervaringen van de bouwheren. Hiertoe werden de reeds geplaatste en in ontwerpfase zijnde composietbruggen in Vlaanderen in kaart gebracht.

2.1 State-of-the-art

In wat volgt worden enkele internationale relevante voorbeelden van VVK toepassingen toegelicht. Dit geeft een impressie van het wijdverspreide gebruik van deze structuren en de mogelijkheden ervan.



Golf club in Aberfeldy, Verenigd Koninkrijk (1992). Deze tuibrug voor voetgangersverkeer heeft een lengte van 113 m, met een vrije overspanning van 63 m. De twee pijlers en het dek van de brug zijn vervaardigd uit glasvezelversterkte kunststof (GVVK), terwijl de tuien bestaan uit aramidevezels beschermd door een omhulsel. De enige onderdelen die niet vervaardigd zijn uit een composiet zijn de fundering, die bestaat uit gewapend beton, en de stalen verbindingen tussen de tuien en het dek van de brug.



Kolding, Denemarken (1997). Voetgangers- en fietsersbrug vervaardigd uit 100% gepultrudeerde GVVK profielen. De brug is 40 m lang en 3,2 m breed. Het totale gewicht bedraagt 120 kN en de belastingscapaciteit is 5 kN/m². De brug werd geïnspecteerd na een levensduur van 15 jaar en er werd geen schade teruggevonden.



Spieringsluis, Werkendam, Nederland (2000). Eerste VVK sluisdeur in Nederland. Totale breedte van de sluis van 6 m. Afmetingen van één paneel: 3,5 m breed en 6,5 m hoog. Werd ontwikkeld op vraag van Rijkswaterstaat.



Oxfordshire, Verenigd Koninkrijk (2002). Eerste wegbrug in een publieke weg opgebouwd uit 100% GVVK en CVVK gepultrudeerde profielen. De brug werd geïnspecteerd na een periode van 12 jaar en er werd geen schade aan de GVVK en CVVK profielen teruggevonden.



Treinstation van Kosino, Chertanovo in Moskou, Rusland (2004). De voetgangersbrug heeft een lengte van 41,4 m, een breedte van 3 m en is gemaakt uit VVK structurele profielen samengevoegd aan de hand van bouten. De brug bestaat uit twee overspanningen van 15 m en één overspanning van 13 m, die geprefabriceerd en samengevoegd werden op de werf zelf. De brug werd geïnstalleerd in minder dan 50 minuten. Het werk duurde in totaal 3 uur en werd uitgevoerd op een zondagmorgen om het treinverkeer zo min mogelijk te onderbreken.



Spoorwegbrug over de hogesnelheidslijn Madrid-Barcelona, in de buurt van Lleida, Spanje (2004). Voetgangersbrug met GVVK profielen. De brug heeft een breedte van 3 m en een lengte van 38 m.



Wegbrug over de M6 snelweg in Lancashire, Verenigd Koninkrijk (2006). De brug bestaat uit GVVK gepultrudeerde profielen met een lengte van 52 m en is ontworpen om voertuigen met een gewicht tot 400 kN te dragen.



Norre Aaby, Denemarken (2007). Constructie van een voetgangers- en fietsersbrug met 100% gepultrudeerde GVVK profielen. De brug heeft een lengte van 23 m en werd gebouwd ter vervanging van een bestaande gewapende betonbrug (GB) die beschadigd was door corrosie. Deze heeft een gewicht van 60 kN, vergeleken met de 1200 kN voor een GB brug. Hierdoor was het mogelijk om de bestaande fundering te hergebruiken. De brug werd geïnstalleerd in minder dan 2 uur, zodat de verstoring van het verkeer minimaal was.



Fuente El Saz in Madrid, Spanje (2007). Deze twee wegbruggen zijn gelegen in de buurt van Madrid op de M111 snelweg. De twee bruggen zijn identiek en bestaan elk uit drie eenvoudig opgelegde overspanningen (10-14-10 m) met 4 hybride glas-carbon VVK liggers. Om de productie van het dek te versnellen, werd gebruik gemaakt van GVVK bekistingspanelen, welke met de hand geïnstalleerd konden worden



P. Vernadskogo metrostation in Moskou, Rusland (2008). Gebogen voetpad gerealiseerd uit VVK profielen gevormd door infusie. Het is de eerste brug vervaardigd aan de hand van vacuïminfusie. Deze technologie elimineert het assemblageproces op de werf en vermindert de kosten voor werkkrachten. De brug heeft een lengte van 22,6 m, een breedte van 2,8 m en een gewicht van 55 kN.



Friedberg brug, Duitsland (2008). Snelwegbrug met een lengte van 27 m en een breedte van 5 m, bestaande uit twee stalen liggers afgedekt door een innovatief multi-cell platform vervaardigd uit VVK profielen. De pultrusieprofielen werden op de werf gelijmd aan de twee stalen hoofdliggers.



Kopenhagen, Denemarken (2008). Renovatie van een rioolwaterzuiveringsinstallatie van 1200 m² met VVK looproosters. De rioolwaterzuiveringsinstallatie is één van de grootste in het noorden van Europa en de keuze voor GVVK is gemaakt op basis van de hoge duurzaamheidsvereisten.



Svendborg, Denemarken (2009). Constructie van een voetgangers- en fietsersbrug met een GVVK dek. De brug is 40 m lang en 3,2 m breed en werd geïnstalleerd in minder dan 2 uur waardoor het onderliggende verkeer zo min mogelijk verstoord werd.



Slanke luifel met een afmeting van 43 x 12 m (kolom elke 10 m) geïnstalleerd op de DSM Chemelot Campus in Geleen, Nederland (2009). Deze werd berekend volgens CUR96, EN 1990 en EN 1991. De constructie bestaat uit een VVK sandwich en HEM stalen profielen.



Madrid, Spanje (2010). Alùunécar voetgangersbrug over de Manzanares rivier. De brug heeft een overspanning van 44 m, een breedte van 3,5 m en bestaat uit een enkele VVK ligger met een gewicht van 230 kN, heeft een lineaire stuksgewijze as en een omgekeerde Ω dwarsdoorsnede. De liggers zijn volledig gemaakt uit carbonvezels en bevatten verschillende langs- en dwarsverstijvers. De liggers zijn samen met de langsverstijvers in één keer geproduceerd door harsinfusie.



Oosterwolde brug, Nederland (2010). Eerste volledige VVK beweegbare brug die een 60 ton vrachtwagen kan dragen. De brug is vervaardigd aan de hand van een vacuüminfusietechniek en ontworpen volgens de CUR96.



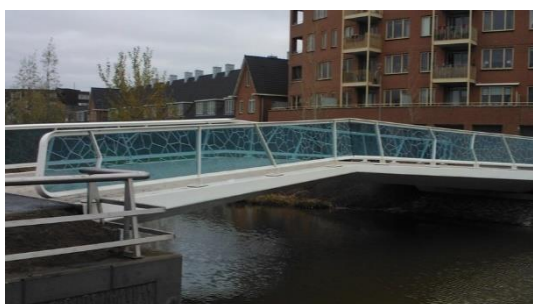
Karrebaeksminde, Denemarken (2011). Renovatie van een bascule wegbrug waar een gepultrudeerd GVVK dek werd geïnstalleerd op de oude staalstructuur. Ook werd een voetgangers- en fietsersbrug opgebouwd uit 100% gepultrudeerde GVVK profielen aan de zijkant van de brug bevestigd om de capaciteit ervan te vergroten. De VVK profielen vervangen het houten dek dat iedere 5 jaar vervangen diende te worden. De renovatie van de brug vond 's nachts plaats om de hinder tot een minimum te beperken, en werd uitgevoerd in enkele uren.



Cuenca, Spanje (2011). Deze voorgespannen spanbandbrug heeft een totale lengte van ongeveer 216 m en bestaat uit drie overspanningen van 72 m. De dwarsdoorsnede bestaat uit gewapende betonnen platen met een dikte van 0,25 m, rustend op 16 carbonvezelkabels met een diameter van 42 mm. In de lengterichting is elke kabel opgedeeld in vijf delen van 44 m om de volledige lengte tussen de twee landhoofden te overspannen.



Kopenhagen, Denemarken (2012). Renovatie van een metrotunnel met gepultrudeerde fenol GVVK looproosters. De roosters zijn een deel van de modernisering van de nooduitgangen en zijn vervaardigd met fenolhars om een betere vuurbestendigheid te bekomen.



'Bronlibelle' brug in Harderwijk, Nederland (2013). Een 6,3 m brede en 22 m lange GVVK voetgangers- en fietsersbrug die twee nieuwe wijken in Harderwijk met elkaar verbindt. Tegelijkertijd zorgt deze brug voor een efficiënte ontsluiting voor de hulpdiensten (bv. brandweerwagens). Het brugdek werd vervaardigd met behulp van vacuïminfusie, waardoor uitstekende sterkte- en stijfheidseigenschappen gecombineerd konden worden met de gewenste ontwerpvrijheid. De brug is ontworpen volgens CUR96, EN 1990 en EN 1991.



Salerno, Italië (2014). Voetgangersbrug in de buurt van de universiteit van Salerno met een lengte van 148 m en een vrije overspanning van 37 m. De brug is gemaakt uit GVVK gepultrudeerde I-liggers en het dek bestaat uit GVVK sandwichpanelen.



Tijdelijke kathedraal van Creteil, Frankrijk (2014). Realisatie van een GVK gridshell gemaakt uit gepultrudeerde buisprofielen. De gridshell biedt een belangrijke vrijheid in vorm voor de ontwerper. De overdekte oppervlakte bedraagt 350 m². 1775 m aan gepultrudeerde buisprofielen werden gebruikt. Het gewicht van de structuur bedraagt 5 kg/m².



Kujalleq, Groenland (2016). Geprefabriceerde GVK wegbrug met een gewicht van 12 ton. Dit staat in schril contrast met de klassieke bouwmaterialen zoals staal en beton, die in dit geval gezorgd zouden hebben voor een gewicht van respectievelijk 25 en 65 ton.



Shanghai, China (2019). 3D-geprinte vezelversterkte brug bestaande uit een ASA (Acrylonitrile styrene acrylate) kunststof met 12,5 massapercent aan korte glasvezels. De brug heeft een lengte van 15,25 m, een breedte van 3,8 m en een totaal gewicht van 5,3 ton. De brug is in staat om vier personen per m² te dragen wat neerkomt op een totale belasting van 13 ton.

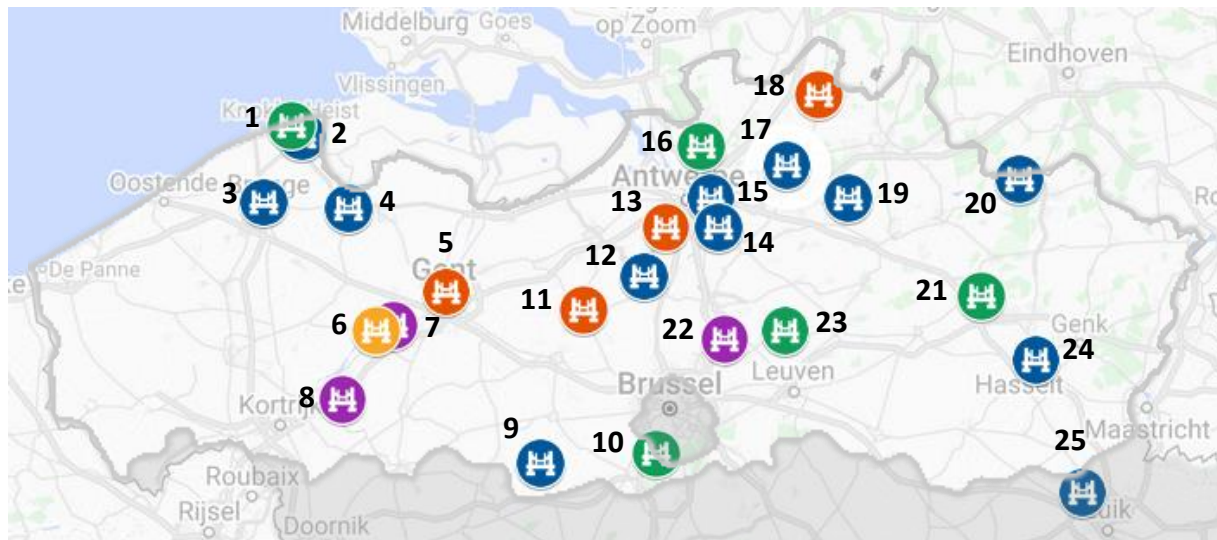
Uit bovenstaande internationale voorbeelden kunnen enkele belangrijke voordelen van VVK structuren gevonden worden. Hieronder wordt een korte olijsting van deze voordelen gegeven.

1. Een VVK is licht in gewicht maar tegelijk ook een sterk materiaal. Hierdoor is het veel eenvoudiger om grote structurele elementen in de productiehal te prefabriceren en deze vervolgens in één stuk naar de werf te transporteren. Door het lichte gewicht zijn zware machines op de werf overbodig en kan het element in slechts enkele uren met één enkele kraan geplaatst worden. Hierdoor wordt de overlast in de omgeving van de werf tot een minimum beperkt. Het lichte gewicht van de VVK elementen zorgt er ook voor dat reeds bestaande funderingen in de meeste gevallen behouden kunnen worden en dat een uitbreiding aan een reeds bestaande structuur mogelijk is.
2. Doordat VVK bestand is tegen zelfs de meest harde omstandigheden zoals vorst-dooicycli, strooizouten, chemicaliën, bacteriën en corrosie, vergen VVK structuren slechts een beperkt onderhoud gedurende hun levensduur.
3. Compositestructuren combineren een lange levensduur met lage onderhoudsvereisten en een licht gewicht waardoor er minder energie verbruikt dient te worden doorheen de levensduur van de structuur. Hierdoor kunnen deze materialen als duurzaam bestempeld worden, wat almaar belangrijker wordt.
4. Aangezien VVK's slechte geleiders zijn voor elektrische stroom kunnen deze ook dicht bij hoogspanningskabels worden geplaatst (zoals bijvoorbeeld boven een treinspoor) zonder dat de aanwezige wervelstromen voor een gevaar kunnen zorgen voor de gebruiker. Hierdoor zijn minder kosten nodig om de landhoofden aan beide kanten van de brug op te hogen.

5. Afhankelijk van de productiemethode kan de vorm van het element aangepast worden aan de noden van de ontwerper. Hierbij is er tevens ook de mogelijkheid voor een combinatie van een VVK met andere materialen.

2.2 Composietbruggen in Vlaanderen.

Ook in Vlaanderen zijn reeds enkele composietbruggen geplaatst. In deze sectie worden deze in kaart gebracht en besproken.



1	<p>Knokke-Heist</p> <p>Gvvk brug met een lengte van 12 m, een breedte van 3 m en ontworpen voor een onbedoeld voertuig van 10 ton. De leuning werd tevens ook vervaardigd uit een composietmateriaal.</p>	[Geen foto beschikbaar]
2	<p>Paardenbrug, Knokke-Heist (2019)</p> <p>De brug is gelegen achter een paardenranch en verbindt verschillende wandelpaden voor paarden. Bovenop het dek van de brug werd een laag zand aangebracht om het dek te beschermen tegen paardenhoeven en een zachte ondergrond te creëren voor de paarden.</p>	
3	<p>Canadabruggen, Brugge (2019)</p> <p>Twee Gvvk voetgangers- en fietsersbruggen uitgevoerd in opdracht van De Vlaamse Waterwegafdeling Bovenschelde—langs beide zijden van de gerenoveerde canadabrug. De bruggen bestaan uit drie overspanningen en hebben een totale lengte van 40,9 m en 41,9 meter waarmee deze voorlopig de langste Gvvk composietbruggen uit één stuk zijn in de wereld. De breedte van de brug bedraagt 4 m. De bruggen werden geproduceerd door FiberCore Europe uit Rotterdam, Nederland en werden geplaatst in samenwerking met Westconstruct NV Oostkamp (lid van de Besix groep). De brug werd</p>	

	ontworpen voor een verdeelde belasting van 5 kN/m^2 en een dienstvoertuig (onbedoeld voertuig) van 60 kN.	
4	Maldegem (2019) De GVK fietsers- en voetgangersbrug verbindt een nieuw aangelegde woonwijk met de achterliggende weg. De eenvoudig opgelegde brug heeft een lengte van 8,6 m en een breedte van 2,4 m. Door het lage eigengewicht waren geen extra kosten noodzakelijk voor de uitvoering van de funderingen.	
5	Vismijn, Gent (2010) Één van de eerste composietbruggen in Vlaanderen. GVK brug met een lengte van 17,5 m en een breedte van 2,5 m in het oude centrum van Gent. Tijdens het ontwerp werd rekening gehouden met een belasting van 5 kN/m^2 . Opmerkelijk aan deze brug is dat deze brug in privaat bezit is.	
6	Fietspaduitbreiding over Leie, Deinze (2017) In opdracht van Infrabel en in samenwerking met FiberCore Europe en Westconstruct werd een nieuwe voetgangers- en fietsersbrug aan de bestaande spoorbrug gemonteerd met een totale lengte van 235 m. Hierbij werd het dek op stalen kniestukken opgelegd met vrije overspanningen van gemiddeld ruim 9 m. De brug werd ontworpen voor een belasting van 5 kN/m^2 en een dienstvoertuig van 5 ton.	
7	Maaigemdijk, Deinze (2020) Deze fietsers- en voetgangersbrug is gelegen in de River Ranch in Deinze en heeft een lengte van 10 m. De brug diende als vervanging van een bestaande brug die te steil in hellingsgraad werd bevonden voor rolstoelgebruikers. De brug werd ontworpen voor een belasting van 5 kN/m^2 en een dienstvoertuig van 5 ton.	
8	Callens, Waregem (2020) De bouwheer wou twee betonnen liggers in de lengterichting met hierop in de dwarsrichting een houten dek en een stalen leuning. Om het onderhoud van de brug te drukken werd uiteindelijk geopteerd voor een GVK brug met een lengte van 8 m.	

<p>9</p>	<p>Baljuwbrug, Galmaarden (2019)</p> <p>Deze fietsers- en voetgangersbrug in het Baljuwpark heeft een lengte van 14 m en een breedte van 2 m. De brug is eenvoudig opgelegd op de beide landhoofden en maakt deel uit van de ophogingswerken van de dijken om overstroming van het park en de omgeving door de rivier te verminderen.</p>	
<p>10</p>	<p>Beersel (2019)</p> <p>GVVK voetgangers- en fietsersbrug met een composieten leuning en een totale lengte van 7 m en een breedte van 2 m. De weinig draagkrachtige grond verplichte het gebruik van een lichte brug om de funderingskosten te beperken.</p>	
<p>11</p>	<p>Passerelle tijsluis, Dendermonde (2007)</p> <p>Voetgangers- en fietsersbrug uit gepultrudeerde GVVK profielen bevestigd aan de zijkant van de tijsluis uitgevoerd door Vink nv in opdracht van Waterwegen en Zeekanaal—afdeling Bovenschelde. Door het beperkte hefvermogen van de sluisdeur moest het gewicht van de voetbrug zoveel mogelijk worden beperkt.</p>	
<p>12</p>	<p>Fietsostrade F18, Puurs (2019)</p> <p>GVVK fietsers- en voetgangersbrug voor de Fiets-O-Strade langs spoorlijn 54 tussen de Puursesteenweg en Eikevlietbaan. Het betreft een brug waarvan het dek volledig van vezelversterkte kunststof werd gemaakt. De brug heeft een nuttige breedte van 4,2 m en een lengte van 16,6 m.</p>	
<p>13</p>	<p>Laadstation Umicore, Hoboken (2010)</p> <p>Aanlegkade met heipalen en verschillende loopbruggen: een aanlegsteiger van 120 m lang, een aanvoerbrug van 45 m lang en een extra vluchtweg richting de betonnen kade van 20 m lang. De brug bestaat uit 11 kunststoffen brugdelen geprefabriceerd in de werkhal van Vink nv en geassembleerd op de werf met bouten, moeren en verbindingshoeken. Tijdens het ontwerp werd een belasting van 4 kN/m² en een doorbuigingsbeperking van L/200 vooropgesteld.</p>	
<p>14</p>	<p>Fietsostrade F11, Mortsel (2019)</p> <p>Glasvezelversterkte kunststoffen fietsers- en voetgangersbrug uitgevoerd in opdracht van de Provincie Antwerpen langs de fietssnelweg F11. De brug heeft een vrije overspanning van 26,6 m en een gewicht van 30 ton, waarmee deze de langste vrije overspanning heeft in België. De brug werd vervaardigd door Composite Structures uit Nederland</p>	

	en geplaatst door Franki Construct. De brug werd aan beide zijden over een afstand van 1,3 m ingeklemd, waardoor een slanker profiel voor de brug gerealiseerd kon worden.	
15	Deurne (2019) Fietsersbrug uit GVVK met een lengte van 30 m en een breedte van 5,5 m, voorzien van een composieten leuning.	
16	Kapellen GVVK voetgangersbrug met een lengte van 10 m en een breedte van 2,5 m, voorzien van een houten leuning.	
17	Moerdreef Malle (2019)	[Geen foto beschikbaar]
18	Hoogstraten (2012) De fietsers- en voetgangersbrug heeft een lengte van 10 m en een breedte van 2.25 m. De brug werd ontworpen voor een verdeelde belasting van 5 kN/m ² .	
19	N134, Lille – Kasterlee (2019) Fietsersbrug over de Aa behorend tot het fietspad N134 Lille-Kasterlee, uitgevoerd in opdracht van de gemeente Lille. De GVVK brug werd geprefabriceerd door FiberCore Europe en heeft een lengte van 20,3 m en een nuttige breedte van 2,5 m.	
20	Center Parcs 'De Vossemere', Mol (2019)	
21	Beringen Koppelbare GVVK brug bestaande uit twee delen met een totale lengte van 8 m en een breedte van 3 m.	[Geen foto beschikbaar]
22	Zemst (2020)	[Geen foto beschikbaar]

<p>23</p>	<p>Jaagpadbrug over de Laak, Tremelo (2018)</p> <p>Uitgevoerd in opdracht van De Vlaamse Waterweg in samenwerking met De Brandt nv. De GVKK brug met een overspanning van 10,3 m en een nuttige breedte van 3 m werd geproduceerd door FiberCore Europe en kan een belasting van 5 kN/m² dragen.</p>	
<p>24</p>	<p>Flanders Nippon Golf & Business Club, Hasselt (2011)</p> <p>De GVKK brug heeft een lengte van 6 m en een breedte van 3 m en is ontworpen voor een verdeelde belasting van 5 kN/m² en een bijkomend dienstvoertuig. De Flanders Nippon Golf & Businessclub was een van de eerste banen waar een onderhoudsvrije InfraCore® Golfbrug voor licht verkeer is geplaatst.</p>	
<p>25</p>	<p>Mal, Tongeren (2019)</p> <p>In opdracht van de stad Tongeren werd een GVKK fietsersbrug geplaatst over de Jeker. De brug werd vervaardigd door FiberCore Europe en werd samen met aannemer Coopmans DC op de werf geplaatst. De brug is 17 m lang en 5 m breed.</p>	

Uit de bovenstaande verkregen informatie in verband met recentelijk uitgevoerd composietbruggen in Vlaanderen, kan gezien worden dat 15 van de in totaal 25 composietbruggen tijdens het tijdsbestek van dit TETRA onderzoeksproject C-Bridge opgeleverd werden, wat neerkomt op 60% van alle composietbruggen in Vlaanderen. Sinds de start van het project is het aantal composietbruggen in Vlaanderen dan ook meer dan verdubbelt, met een toename van 10 bruggen in 2018 naar 25 in 2020. Er kan gesteld worden dat de kennisoverdracht binnen de bouwsector en meer bepaald de bruggenbouw over dit veelbelovende materiaal meer dan geslaagd is.

3 DIAGNOSE VAN DE HIATEN IN DE KENNIS

In overleg met de gebruikersgroep van het C-Bridge project werd een diagnosematrix opgesteld met de aanwezige hiaten in de kennis van de leden. In het voortraject werden reeds de belangrijkste algemene hiaten vastgesteld waarop de volgende werkpakketten zijn afgestemd. De diagnosematrix is de finalisering/verfijning van dit proces. Met kennishiaten wordt verwezen naar die kennis bij de gebruikersgroep die nodig is om in eigen beheer een Vlaams composietproject te ontwerpen, te bestellen, te bouwen en/of te evalueren en op te leveren. Dit zijn dan ook de stappen die doorlopen worden bij de case studies verder in dit project.

In dit onderzoeksproject wordt de doelgroep gedefinieerd als de volledige keten van actoren binnen de totstandkoming van een composietbrug. Hierin worden vier specifieke doelgroepen onderscheiden, namelijk de overheid/opdrachtgever, de studie bureaus, de algemene aannemers en de producenten en verwerkers. Elke specifieke doelgroep kent andere noden en wensen, welke in onderstaande tekst worden toegelicht.

Overheid/opdrachtgevers (Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Afdeling Expertise Beton en Staal, Cellen Fietsbeleid Provincies, Diensten gerelateerd tot Bruggen bij Steden en Gemeenten, Infrabel, Havenbesturen, Dienst Waterwegen en Zeekanaal, ...) zijn overtuigd van het potentieel en de nood maar zien belemmeringen inzake opstellen van bestekteksten, controle van de offertes en

aanvaarding van duurzaamheid op lange termijn. Daarnaast is er tevens nood aan renovatie van het huidige bestand van bruggen door onder meer de toestand van verschillende ‘brokkelbruggen’ in Vlaanderen en de bouw van bijkomende bruggen door de vergroening van de mobiliteit en de uitbouw van een fietsbeleidplan en fietssnelwegen in Oost-Vlaanderen en Antwerpen.

Vlaamse **studiebureaus** (Stendess, SBE, Tractebel, Antea, ...) zijn op dit ogenblik nog niet gespecialiseerd in de materie, omwille van het beperkte aantal opdrachten vanuit de overheid. Enkele ingenieurs hebben zich in Nederland bijgeschoold en in zeer beperkte mate is er globale kennis van rekennota's uit Nederland. Evenwel is er een gebrek aan kennis omtrent interpretatie van bestekteksten, berekeningsmethodiek, kostprijsanalyse, etc. De kennis van de instromende ingenieurs is eveneens heel beperkt. Er wordt over het algemeen beroep gedaan op Nederlandse kennis. Ook bij controle-orgaan SECO is de huidige ervaring zeer beperkt.

Algemene **aannemers** (Besix, STRABAG, Victor Buyck, ...): traditioneel zijn in Vlaanderen geen aannemingsbedrijven of constructeurs gespecialiseerd in composietbruggen. Aannemingsbedrijven zijn typisch eerder werkzaam in een sector (gebouwen/civil/beide) en constructeurs zijn typisch gespecialiseerd in een materiaal, bijvoorbeeld in beton of staal en bekijken de markt vanuit dat standpunt. Hun ervaring met composieten is over het algemeen zeer beperkt, maar hun interesse is duidelijk aanwezig. Afhankelijk van hun standpunt in de markt zijn zij geïnteresseerd in opvolging van levering en plaatsing door een onderaannemer, in opportuniteiten voor introductie van composiet in hun activiteiten, of in verduidelijking van de richtlijnen (inclusief acceptatie door een controle-orgaan zoals SECO).

Producenten en verwerkers (Vink, Exel, CGK, ...): composietproducerende en -verwerkende bedrijven ondervinden in Vlaanderen geen drive vanuit de overheid om zich meer naar de bruggenbouwmak te richten. Op het ogenblik dat dit gebeurt zal een innovatiepad kunnen worden opgericht. Zoals gezegd zijn er op dit ogenblik nog geen Vlaamse bedrijven die rechtstreeks “full-composiet” bruggen in Vlaanderen kunnen produceren. Nochtans zijn alle faciliteiten aanwezig die dit mogelijk moeten maken.

	Overheden	Studiebureaus	Aannemers	Producenten
Bestekbepaling	X	X		X
Normering/regelgeving	X	X	X	X
Structurele analyse		X		
Kostenaspecten	X	X		
Uitvoering, werfopvolging, oplevering en onderhoud	X		X	
Langetermijnperspectieven	X			

Per specifieke doelgroep kan volgende impact verwacht worden als gevolg van dit C-Bridge project:

- De resultaten van het project stellen de Vlaamse bouwheren in staat om op een correcte manier bestekteksten op te stellen voor composietbruggen. Zonder dat daarvoor een éénduidige Belgische norm beschikbaar is, kunnen de elementen die afwijken van de gangbare voor betonnen of stalen bruggen of brugonderdelen op een correcte manier geïnterpreteerd worden. Zij kunnen bovendien de ter beschikking gestelde rekennota's op een correcte manier interpreteren en een correcte afweging maken.
- De resultaten van het project stellen de Vlaamse studiebureaus in staat om zelf op weg te gaan met berekeningen rond composietbruggen en brugonderdelen. Hierbij wordt de bestaande achterstand ten opzichte van de Nederlandse concurrenten ingelopen. Zij kunnen dan eveneens pogen een waardeketen binnen Vlaanderen op te bouwen met Vlaamse aannemers en producenten. In een eerste fase kunnen zij op een veel onafhankelijker manier als partner

optreden van buitenlandse leveranciers. Dit levert hen een competitievoordeel op dat noodzakelijk is voor innovatie. De huidige innovatie komt op dit ogenblik ook vooral uit het buitenland (Nederland).

- De algemene aannemers en constructeurs zullen gewapend zijn om de uitdagingen die composietbruggen als onderaanneming met zich meebrengen qua uitvoering, opvolging, oplevering en onderhoud te trotseren. Bovendien kunnen zij mogelijks als partner optreden indien er een start zou worden genomen met het produceren met vacuüm-injectie in Vlaanderen.
- Producenten en leveranciers situeren zich op dit ogenblik vooral op het gebied van de brugdekken met behulp van de pultrusietechniek. Vanuit hun standpunt zullen de resultaten van het project leiden tot een duidelijkere profilering van hun producten op de algemene markt. Deze markt is omwille van het ontbreken van opdrachten op dit moment beperkt tot de private markt, bijvoorbeeld aanlegsteigers van bedrijven of loopbruggen in de industrie. Productie van full-composietbruggen met behulp van de vacuüm-injectietechniek is op dit ogenblik niet in Vlaanderen aanwezig. Het project bevat alle mogelijke partners zodat in een vervolgtrajec een start van deze productietechniek in Vlaanderen zeker tot de mogelijkheden behoort.

4 REPRESENTATIEVE CASES

In overleg met en aangeleverd door de gebruikersgroep worden vier representatieve testcases gekozen. Deze cases zijn qua afmetingen, belastingen en productietechniek representatief voor de in eerste instantie beoogde markt. Deze testcases zullen in de volgende werkpakketten terugkomen en helpen bij meerdere projectobjectieven zoals:

- Praktische toetsing voor de onderzoeksvragen uit de verschillende werkpakketten;
- Demonstratie van de technologie;
- Kennisoverdracht naar de bedrijven doordat alle stappen (bestek, analyse, uitvoering, etc.) ook in de praktijk doorlopen worden;
- Concrete data en illustraties voor gebruik bij de richtlijnen.

In de volgende secties worden de gekozen cases weergegeven en wordt een korte motivering gegeven om ze te gebruiken als representatieve cases en wordt beschreven waar deze in het verdere verloop van dit project gebruikt zullen worden.

4.1 Canadabridgen, Brugge

De eerste geselecteerde case is die van de canadabridgen in Brugge. Op het moment van publicatie zijn dit de langste vezelversterkte fietsers- en voetgangersbruggen in de wereld die vervaardigd zijn uit één stuk. De brug is aan de zijkanten eenvoudig opgelegd op de landhoofden, terwijl ze met behulp van schroeven is vastgemaakt aan de twee tussensteunpunten. Deze bruggen dienen als vervanging van de twee houten bruggen die aan beide kanten van de wegbrug van de Leopold I-laan geplaatst waren en in slechte toestand verkeerden door onder andere rotting van de houten steunpalen. De VVK bruggen hebben als voordeel dat ze geplaatst konden worden zonder ingrijpende werken aan de landhoofden door het beperkte gewicht en het lage onderhoud dat vereist is bij composietbruggen.

In het verdere verloop van het C-Bridge project zal deze case gebruikt worden voor de uitvoering van statische belastings- en trillingsproeven door de aanwezigheid van meerdere interne continue optische vezels die het mogelijk maken om de rekken en daaruit volgend de vervormingen in de brug op te meten. Het effect van temperatuurgradiënten en de bijhorende vervormingen zal tevens door deze sensoren vastgelegd kunnen worden. Verder zal deze case ook gebruikt worden voor de analyse van de bestekteksten en de inkoopeling in het standaardbestek 260 (MOW). Als laatste zal de invloed van

de orthotropie en de leuning bestudeerd worden aan de hand van verschillende modellen in bouwkundige rekensoftware.

4.2 Fietsostrade F11, Mortsel

De tweede case die uitgelicht wordt is de brug in Mortsel die deel uitmaakt van de fietsostrade F11. Ten tijde van de publicatie is dit de vezelversterkte fietsers- en voetgangersbrug met de langste vrije overspanning in België. Naast het voordeel van het lage eigengewicht en het onderhoudsgemak van composietmaterialen was tevens de lage elektrische geleidbaarheid ervan een belangrijk punt in de materiaalkeuze in het ontwerp. Hierdoor kon de brug dichter tegen de onderliggende hoogspanningskabel van het treinverkeer geplaatst worden, waardoor de ophogingswerken voor het landhoofd beperkt konden worden.

In tegenstelling tot de VVK canadabruggen, werd deze brug aan beide zijden over een afstand van 1,3 m ingeklemd, waardoor een slanker profiel voor de brug gerealiseerd kon worden. Door de andere randvoorwaarden van deze brug zullen hierop eveneens een statische belastings- en trillingsproef uitgevoerd worden. Daarnaast zal ook de beschikbare bestektekst en rekennota geanalyseerd worden.

4.3 Fietsostrade F18, Puurs

De derde geselecteerde case is de brug in Puurs, die deel uitmaakt van de fietsostrade F18. Enkele maanden na de oplevering en openstelling van deze vezelversterkte fietsers- en voetgangersbrug, waren er verschillende klachten in verband met de trillingen en het comfort van de brug. Om die reden en mede door de beschikbaarheid van de rekennota zal deze brug onderzocht worden. Zo zullen verschillende trillingsproeven uitgevoerd worden op deze brug om de comforteisen en de rekennota te controleren.

4.4 Tremelo

De fietsers- en voetgangersbrug in Tremelo, die als vierde case gekozen wordt, werd opgeleverd in 2018 en bestaat uit een lage caissonligger uit glasvezelversterkte kunststof en heeft een enkele isostatische overspanning van 10,3 m. In het kader van het C-Bridge project werd informatie uit een statische belastingsproef verkregen via MOW en door de UGent uitgevoerde trillingsproeven beschikbaar van deze brug.

Voor de statische belastingsproef dienden de maximale belastingen op de brug echter beperkt te worden door de onderbouw. De maximale belasting per landhoofd is ongeveer 55 kN, wat betekent dat de verdeelde belasting op de brug moet beperkt worden tot 3 kN/m².

Meer informatie in verband met de door UGent uitgevoerde trillingsproeven wordt in de volgende sectie gegeven.

4.5 Selectie composietbruggen voor trillingsanalyse

Voor het verkrijgen van een goed inzicht in het trillingsgedrag van composietbruggen, met name de eerste eigenfrequentie, de verticale versnellingen en de dempingsverhouding, werden ten slotte tien bruggen in Vlaanderen geselecteerd waarop verschillende trillingsproeven werden uitgevoerd. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de tien geselecteerde bruggen met de belangrijkste geometrische eigenschappen.

No.	Location	Afk.	Nuttige breedte, B _{nut} [m]	Lengte(s), L [m]	Oppervlakte, A [m ²]
1	Brugge	BRG1	4,0	18,0 - 8,0 - 14,9	163,60
2	Brugge	BRG2	4,0	17,6 - 8,0 - 15,9	167,60
3	Maldegem	MAL	2,4	8,6	20,52
4	Gent	GHE	2,5	17,5	43,75

5	Puurs	PUU	4,2	16,6	69,72
6	Mortsel	MOR	4,3	29,2	114,38
7	Deurne	DEU	2,8	10,0 - 10,0	56,00
8	Lille	LIL	2,5	20,3	50,75
9	Tremelo	TRE	3,0	10,3	30,90
10	Galmaarden	GAL	2,0	14,0	28,00

De trillingsproeven worden uitgevoerd aan de hand van de VibSensor smartphone-applicatie. Hiermee is het mogelijk om met een minimum aan middelen en op een zeer eenvoudige manier de verticale (loodrecht op het vlak) en horizontale (in het vlak) trillingen van het brugdek op te meten.

Drie verschillende trillingsproeven werden uitgevoerd. De heel en excitatietest waarbij één operator de trilling op het brugdek aanbrengt en waaruit de eigenfrequentie en de dempingsverhouding van het brugdek geanalyseerd kunnen worden. Aan de hand van een voetgangersstroom en de VibSensor applicatie is het vervolgens mogelijk om het comfort van de brug te bepalen.

5 CONCLUSIE

In deze whitepaper werd in de eerste plaats een korte kennismaking gegeven met composiet-materialen en de mogelijke aandachtspunten bij het gebruik. Verder werd een state-of-the-art van de composiet-toepassingen in structurele applicaties met een nadruk op bruggenbouw weergegeven en werd deze getoetst aan de Vlaamse context door het in kaart brengen van de composietbruggen in Vlaanderen. Vervolgens werd een diagnosematrix met betrekking tot de hiaten in de kennis van de leden van de gebruikersgroep opgesteld om de nodige kennis aan te reiken om in eigen beheer een Vlaams composietproject te ontwerpen, te bestellen, te bouwen en/of te evalueren en op te leveren. Als laatste werden representatieve cases vastgelegd die in de loop van de andere werkpakketten terug zullen komen en helpen bij meerdere projectobjectieven.