

Kom
verder

SAXION

process

indust

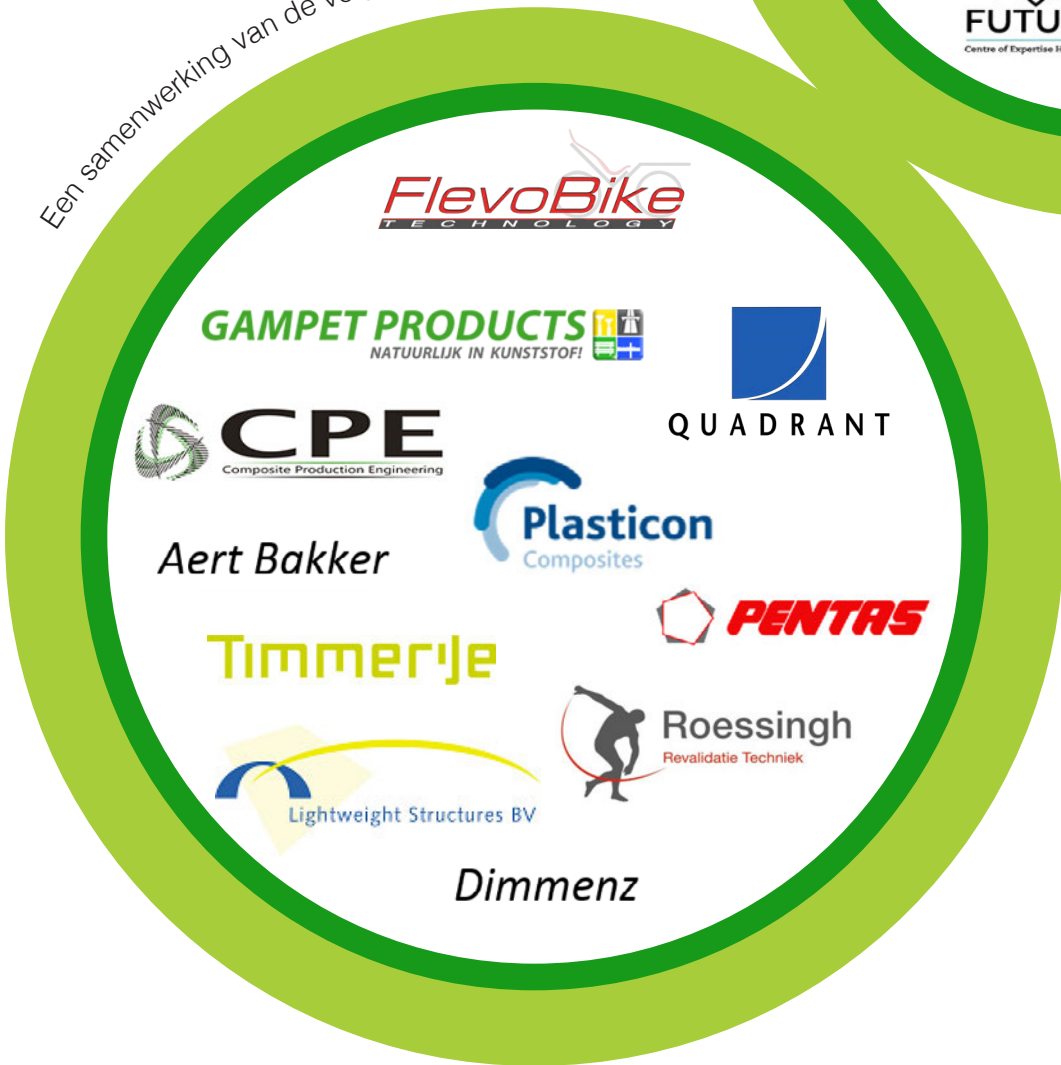
interactiv



Toepassen van thermoplastische composieten

Naar aanleiding van het project 3DComp: 3D print technologie voor
continu-vezelversterking in kunststof producten

Een samenwerking van de volgende partijen:



Lectoraat Lichtgewicht Construeren
Projectnummer: 2014000555

Dit onderzoek is medegefinancierd door Regieorgaan SIA onderdeel van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO). *Sia-Raak 20140119M*

COLOFON

Titel: Toepassen van thermoplastische composieten - naar aanleiding van het SIA RAAK MKB project *3DComp: 3D print technologie voor continu-vezelversterking in kunststof producten project*

Datum: Augustus 2016

Auteurs: Ferrie van Hattum, Thomas de Bruijn, Rik Voerman, Dick Mulder, Joris Wolters, Erik Goselink, Karin van Beurden, Rini Zwikker

Met medewerking van

- Aert Bakker
- Composite Production Engineering B.V.
- DimmenZ
- Flevobike VoF
- Gampet Products B.V.
- Lightweight Structures B.V.
- Pentas Moulding B.V.
- Platicon Europe B.V.
- Polymer Science Park
- Quadrant Engineering Plastic Products B.V.
- Timmerije B.V.
- Roessingh Revalidatie Techniek B.V.
- ThermoPlastic composites Research Centre
- Universiteit Twente
- Lectoraat Industrial Design
- Lectoraat Mechatronica
- Lectoraat Lichtgewicht Construeren
- Nationaal Regie Orgaan SIA
- Grafische vormgeving: Charlotte Bak

Fotografie en auteursrecht

Dit is een uitgave van Saxion University of Applied Sciences.

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	6
Samenvatting	8

Hoofdstuk 1

Inleiding	10
-----------	----

Hoofdstuk 2 Introductie TPC materialen

2.1 De markt van composieten en kunststoffen	12
2.2 Vezelversterking in thermoplastische kunststoffen	13
2.3 TPC verwerkingstechnieken	14
2.4 TPC materiaalontwikkelingen	15
2.5 3D printen	15
2.6 3D Scannen	15

Hoofdstuk 3 Nieuwe TPC verwerkingstechnieken

3.1 Stand der techniek van TPC	16
3.2 Het low-cost antwoord op tapeverwerking	17
3.3 Prestaties van de ontwikkelde processen	18
3.4 Geometrische beperkingen verwerking UD-tape	20

Hoofdstuk 4 Materiaalkarakterisatie en -validatie

4.1 Stijfheid en sterkte van TPC versterkte producten	22
4.2 Milieu impact (LevensCyclus Analyse)	24

Hoofdstuk 5 Praktijkcases

5.1 Protheseverstijving	27
5.2 Ortheseverstijving	28
5.3 spuitgietinserts	30
5.4 Kruipvermindering in PA met gietinsterts	32
5.5 Post-process verstijving van gordingen	34
5.6 Vezelversterkt plaatwiel voor fietsen	36
5.7 Vezelversterking in rotatiegietproducten	37

Hoofdstuk 6 Toekomstige ontwikkelingen met TPC materialen

6.1 TPC in de circulaire economie	38
6.2 Sectorprognose	39
6.3 Het lectoraat Lichtgewicht Construeren	39

Bijlagen

Bijlage 1: Projectpartners	40
Bijlage 2: Verslagen en rapporten	41
Bijlage 3: Referenties	43



Figuur 1: Het team Saxion studenten werkzaam binnen het project, eind 2015.



VOORWOORD

Thermoplastische composieten vormen een relatief nieuwe groep materialen met goede mogelijkheden voor toepassingen voor de kunststof verwerkende industrie. Daarbij zijn kosten en verwerkingsmogelijkheden belangrijke factoren voor succes.

Het Lectoraat Lichtgewicht Construeren van de Saxion hogeschool Enschede, in samenwerking met een groot aantal bedrijven (hoofdzakelijk MKB) en partner instituten, en dankzij de financiële ondersteuning van SIA-RAAK, heeft de afgelopen twee jaar onderzoek gedaan binnen het project 3DComp, naar de praktische toepasbaarheid en kosten efficiëntie van deze materialen voor de industrie. Het huidige rapport biedt een samenvattend overzicht van de activiteiten en behaalde resultaten van dit onderzoek, onder andere aan de hand van de ontwikkelde technologieën en case studies.

Nu de onderzoeksperiode is afgerond, kunnen we terugkijken op een geslaagd project. Naast de beschreven resultaten, direct gevolg van de goede en prettige samenwerking tussen de partners, zijn ook andere, belangrijke resultaten behaald: een groot aantal docenten/onderzoekers en vooral veel studenten hebben dankzij dit project hun kennis kunnen vergroten op dit gebied en vooral ook, door directe samenwerking, geleerd wat belangrijk is om een en ander relevant te maken voor de industrie. Daarnaast is een deel van deze kennis intussen geïntegreerd in het onderwijs op de hogeschool (via Bachelors en Masters onderwijs) en zijn meerdere samenwerkingen in nationale en internationale projecten een direct gevolg van de resultaten die in dit project in de afgelopen twee jaar zijn gehaald.

Ik kijk persoonlijk met veel plezier en bescheiden trots terug op dit project en de plezierige samenwerking met de project-partners: ik hoop dat u de weerslag hiervan terugvindt bij het lezen van dit rapport!

Met vriendelijke groet,

Ferrie van Hattum

Lector Lichtgewicht Construeren
Saxion Hogeschool

Enschede, Augustus 2016



SAMENVATTING

Veel kunststofverwerkende bedrijven zien in hun huidige productie goede ontwikkelingsmogelijkheden voor toepassing van continu-vezelversterkte thermoplastische composieten die recent vooral in de aerospace- en automotive-industrie een groeiende toepassing vinden. Het lectoraat Lichtgewicht Construeren van Saxion Hogeschool, krijgt hierover in toenemende mate vragen.

Dit rapport is het resultaat van het project 3DComp dat erop gericht is om 3D-print technologieën te combineren met continu-vezelversterkte thermoplastische composietmaterialen, en daartoe innovatieve kennis en technologie te ontwikkelen op het gebied van:



1. Productontwerp met



2. Verwerking van



3. kostenreductie van (toepassing van) en



4. milieu-effecten van (toepassing van)

deze technologie in innovatieve en concurrerende producten voor het bedrijfsleven.

In het eerste deel van het project is kennis en technologie ontwikkeld met kenniscentra in directe samenwerking met de deelnemende bedrijven. Dit is vervolgens toegepast op concrete producten van de deelnemende bedrijven in het tweede projectdeel. De beoogde producten zijn tegelijk representatief voor andere toepassingen in de vertegenwoordigde sectoren, vanwege de gebruikte productietechnieken en typische productiegroottes, waarmee een toekomstige potentiële impact van de uitkomst van dit project wordt vergroot. Op vele onderdelen in het project zijn interessante resultaten behaald, die aansporen tot nader vervolgonderzoek. Hieraan wordt in dit rapport richting gegeven door middel van aanbevelingen. Voor details van de projecten wordt verwezen naar de projectverslagen.

1 Inleiding



Veel bedrijven worden in hun ontwikkelingsmogelijkheden beperkt door de beschikbaarheid van, dan wel beperkte bekendheid met nieuwe materialen, processen en technologieën en de daaruit voortvloeiende noodzakelijke aanpassingen en resulterende kosten. Een goed voorbeeld zijn composietmaterialen (veelal continu-vezelversterkte kunststoffen) en daarbinnen met name de momenteel sterk in opkomst zijnde thermoplastische composieten (TPC). TPC vinden recent in toenemende mate toepassing in vooral de luchtvaart- en ook steeds meer in de automobielenindustrie. Hierdoor winnen TPC in belangstelling: vooral voor toepassingen in aanpalende sectoren. Voor de industrie en de medische sector biedt dit materiaal grensverleggende kansen.

Hoewel bedrijven vaak de voordelen inzien van de aan deze materialengroep geassocieerde hoogwaardige eigenschappen (bijv. hoge stijfheid en sterkte bij laag materiaalgewicht, vormvrijheid en de mogelijkheid tot functie-integratie), bestaan tegelijkertijd grote vragen over het ontwerpen met, het verwerken van en de kosten van de integratie van deze materialen in hun producten en processen. Parallel hieraan bestaat onduidelijkheid over de positieve dan wel negatieve milieueffecten van het gebruik van de materialen in het product, met betrekking tot productie, gebruik en end-of-life.

Het lectoraat Lichtgewicht Construeren is in 2013 opgericht, juist vanwege de groeiende mate van bedrijfsvragen op dit gebied. Om deze vragen te beantwoorden, is het lectoraat met onderzoek begonnen naar het low-cost verwerken van continu-vezelversterkte thermoplastische composieten. Daarbij wordt onder andere gekeken naar het gebruik van 3D printtechnieken - in samenwerking met het lectoraat Industrial Design - waarmee het mogelijk wordt preforms te maken voor gebruik als structurele inserts in spuitgietdelen, of om lokale verstijvingen aan te brengen op bijvoorbeeld extrusie- of vacuüm gevormde schaaldelen of als geïntegreerde verstijving in een extrusieproces. Naast automatisering - in samenwerking

met het lectoraat Mechatronica - is dit een belangrijke stap om te komen tot een significante kostenreductie van lichtgewicht composiettechnologie, één van de noodzakelijke voorwaarden voor een bredere industriële toepassing.

In dit document worden onderzoeksresultaten samengevat van 3D-print technologieën in combinatie met continu-vezelversterkte thermoplastische composietmaterialen, met betrekking tot:

- 1 - productontwerp met
- 2 - verwerking van
- 3 - kostenreductie van (toepassing van) en
- 4 - milieu-effecten van (toepassing van) deze technologie in innovatieve en concurrerende producten voor de maakindustrie.

Daarbij heeft de volgende onderzoeksvraag centraal gestaan:

“Op welke wijze kan het gebruik van continu-vezelversterkte thermoplasten met behulp van 3Dprint-technologie verankerd worden in het kunststof productontwerp- en productieproces, zodat dit leidt tot kwalitatief goede, kosteneffectieve producten, met structurele eigenschappen en een positief milieu-effect?”

Een beschrijving van de state of the art op het gebied van TPC wordt gegeven in hoofdstuk twee. In hoofdstuk drie wordt beschreven welke verwerkingstechnieken zijn onderzocht en tot welke prestaties en beperkingen deze technieken leiden. De eigenschappen van TPC worden in hoofdstuk vier toegelicht. Daarna worden voorbeelden gegeven van uitgewerkte productcases. Tot slot wordt een doorkijk gegeven naar de ontwikkelingen van TPC in de nabije toekomst.

2 Introductie TPC materialen

2.1 De markt van composieten en kunststoffen

In de kunststofverwerkende industrie wordt al veel gewerkt met continu-vezelversterkte materialen. Dit zijn vaak thermohardende kunststoffen (polyester, epoxy), veelal met glasvezel- en koolstofvezelversterking. Thermohardende materialen zijn ook terug te vinden in een groot deel van lopende toegepast-onderzoeksprojecten op composiet-gebied.

De vezels zorgen hierbij typisch voor stijfheid en sterkte, waarbij de polymeer zorgt voor de vorm, krachtoverdracht, chemische bestendigheid, uiterlijk, etc. Typische processen zijn vezelspuiten, (SMC/BMC) persen, pultrusie, RTM/vacuüminjectie en wikkelen. Wereldwijd wordt deze composietmarkt geschat op 60.000 M€, met een gemiddelde groei van 4-5% in de periode 2002-2010 (1). Verdere groei wordt verwacht, een duidelijke indicatie voor de groeiende toepassing van deze groep materialen. Dit verschilt echter sterk per sector; waar in bouw, maakindustrie en windenergie de groei constant blijft, is de verwachting dat juist in de high-end sectoren, waar met name koolstofcomposieten gebruikt worden (aerospace en deels automotive), de groei nog verder toeneemt naar 13-17% (1,2).

De discrepantie in groei tussen high-end en low-end is deels toe te schrijven aan de relatief hoge kosten en investeringen, van zowel composietmaterialen als benodigde automatiseringstechnologie. Deze zijn juist in de low-end segmenten, door de veelal kleinere bedrijven die hierin actief zijn en de kleinere product-series, kritischer voor een succesvolle toepassing. Daarnaast is een belangrijke drijfveer achter de groei in (lichtgewicht) compo-

siet-toepassingen de reductie van productgewicht, hetgeen deels wordt gedreven door de behoefte aan productoplossingen die een mindere aanslag doen op natuurlijke bronnen en de in toenemende mate stringentere CO2-wetgeving (1,2). Dit project onderscheidt zich door juist met laagdrempelige technologie en goedkopere TPC materialen ook de andere sectoren toegang te verschaffen tot de veelbelovende nieuwe TPC technologie.

De markt voor niet-versterkte kunststoffen is aanzienlijk groter, vergeleken met die van composieten: alleen al in Europa, hadden kunststofverwerkers en –producenten in 2011 een omzet van 283.000 M€, weliswaar met een lagere groei van rond de 4% per jaar. Het grootste deel wordt gevonden in niet-structurele toepassingen zoals verpakkingen en elektronica, waarvan ruwweg bijna 50% van de markt bestaat uit polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP) (3). Typische processen hierbij zijn spuitgieten, extrusie, thermovormen, blowmoulden en rotatiegieten. De drijfveren voor groei zijn vrijwel identiek aan de composietindustrie. Daarnaast heeft de sector de ambitie om de beeldvorming rondom milieu-impact van deze materialen te verbeteren om groei te verzekeren.

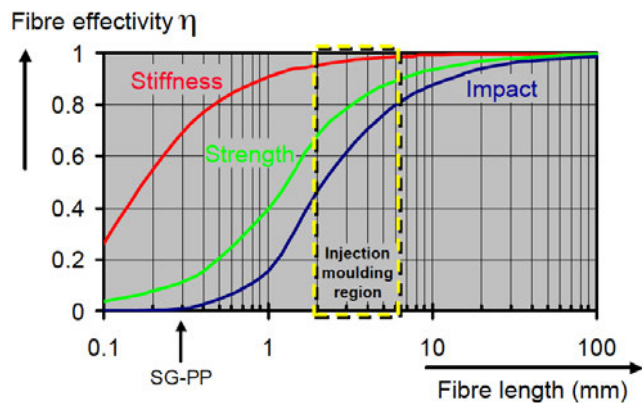
2.2 Vezelversterking in thermoplastische kunststoffen

Om de mechanische eigenschappen van kunststoffen te verbeteren, en daarmee het mogelijke toepassingsgebied te vergroten, wordt vaak gebruikt gemaakt van vezelversterking. Het is bekend dat de eigenschappen van vezelversterkte kunststoffen toenemen met toenemende vezellengte in het product, zoals schematisch weergegeven in Figuur 2 (4).

In de figuur is te zien, dat (wanneer de vezellengte in een kunststof product toeneemt) een aanzienlijke verbetering optreedt in kritische eigenschappen als stijfheid, sterkte en impactsterkte. De eigenschappen halen vrijwel het niveau van wat met continu-vezelversterking mogelijk is indien de vezellengte lengte toeneemt tot meer dan 20 mm.

De verbetering in mechanische eigenschappen wordt benut in verschillende kunststofverwerkingsprocessen; kortvezelspuitgieten, met vezellengtes typisch tot 1 mm (SG-PP in figuur 2), geeft al een aanzienlijke verbetering in stijfheid en sterkte. Dit is een veelgebruikte oplossing in kunststof-toepassingen. Vezelbreuk vindt hier weliswaar in zekere mate plaats in schroef en matrijs tijdens de verwerking (5).

Een recentere ontwikkeling is het gebruik van LFT's in spuitgietproducten (lang-vezel versterkte kunststoffen – rechts van de gele zone in figuur 2), die door gebruik van langere initiële vezellengte en aangepaste procesparameters, de effecten van vezelbreuk zoveel mogelijk reduceren. Een verdere verbetering in vezellengte kan bereikt worden door gebruik van extrusion-compression moulding van indirect LFT materiaal (gebruik langvezelversterkt granulaat) of LFT-Direct (direct gebruik droge vezelroving en kunststof granulaat), waarin extrusie- en persproces gecombineerd worden (6).



Figuur 2: Effect van vezellengte op kunststof composiet eigenschappen (4).

Door gebruik van aangepast extruderschroef-ontwerp en lagere afschuifspanningen in het persproces, blijft de vezelbreuk nog meer beperkt, waardoor betere eigenschappen mogelijk zijn. Vanwege het positieve effect op voornamelijk de impact-eigenschappen (zie figuur), is dit een veelgebruikte techniek in de automobiel industrie. Dit geldt als alternatief voor de reeds lang-bestaande GMT-technologie, waar cm-lange glasvezelversterking random in een persproduct ligt (7). Naast het gebruik van een (duurder) half-fabriekaat, heeft dit proces echter als nadeel de beperkte vloeieigenschappen en resulterende vormvrijheid.

Voor nog langere vezels worden continu-vezel weefsels, geïmpregneerd met thermoplastische kunststof, toegepast, waarbij vormvrijheid nog beperkter is in de toepassing. Met deze technologie worden composiet half-fabrikaten (veelal in plaatmateriaal) opgewarmd door bijvoorbeeld infraroodpanelen en vervolgens tot delen geperst of vervormd (8). Door voortdurend onderzoek naar materiaal- en procesgedrag en kritische punten zoals vervorming en hechting (bv. 9,10), worden intussen op deze wijze vliegtuigdelen gemaakt waar bijvoorbeeld de hoge stijfheid en sterkte door gebruik van continu-vezel gecombineerd worden met de superieure impact- en vermoeiingseigenschappen van thermoplastische composieten (11,12). Een belangrijke rol is hier weggelegd voor Nederlandse bedrijven als Fokker en Ten Cate.

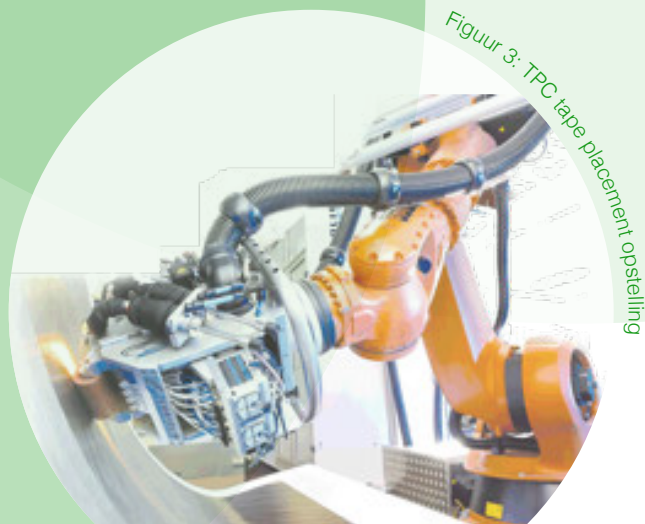
2.3 TPC verwerkingstechnieken

De toename in het gebruik van zowel composietmaterialen als kunststoffen over de afgelopen decennia is, naast toenemend inzicht in materialen en processen, voornamelijk gedreven door de toenemende vraag naar duurzamere producten. Verduurzaming is namelijk mogelijk door minimalisering van het gebruik van energie en materialen, terwijl wetgeving stuurt op vermindering van CO₂-uitstoot (2, 13). Hierdoor hebben composieten in snel tempo interessante technologische ontwikkelingen doorgevoerd, die in de nabije toekomst hun weerslag zullen hebben op het gebruik van met name continuvezel versterkte thermoplastische kunststoffen.

In de aerospace industrie wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van 'tape laying' van continu vezelversterkte kunststoffen. Hierbij is onderscheid te maken tussen Automated Tape Laying (ATL), waarbij bredere tapes worden gebruikt, en Automated Fibre Placement (AFP), waarbij verscheidene smallere tapes naast elkaar worden gepositioneerd, ten behoeve van een grotere geometrische vrijheid (14). In beide processen wordt de tape nauwkeurig geplaatst op een oppervlak, met behulp van numerieke besturing, volgens een van tevoren vastgesteld traject (14,15). De hoge mate van automatisering, die mogelijk is met dit proces, heeft een positief effect op product-kwaliteit en productie-snelheid en daarmee kostenreductie. Bovendien staat de technologie toe dat het gebruik van het materiaal geoptimaliseerd kan worden voor elke structuur, ongeacht het belastinggeval. Dit houdt in dat alleen daar materiaal gebruikt wordt waar het nodig is; in de richting waarin deze het meest effectief werkt, en met continue vezel. Hierdoor worden de beste mechanische eigenschappen verkregen. In de praktijk kan dit leiden tot geoptimaliseerde structuren die een aanzienlijke gewichtsreductie mogelijk maken bij gereduceerde kosten. Hoewel ATL veelal gebruikt wordt met thermohardende prepregs, is een indrukwekkende ontwikkeling gaande met continue vezelversterkte thermoplastische composieten door lokaal te verwarmen met een laserbron. De tapes bestaan veelal uit 'high-end' thermoplasten zoals PEEK, PPS en PEI, in combinatie met glas-, aramide- of koolstofvezel (14-16).

Hoewel met ATL in potentie een aanzienlijke kostenreductie mogelijk is, is er vanuit de automotive industrie een trend te zien naar vergaande proces-automatisering om composiet productiekosten te minimaliseren. Een goed voorbeeld hiervan is te vinden in de bouw van de BMW i3, die, gedreven door gewichtsbesparing, voor een significant deel uit koolstofvezel versterkt kunststof bestaat, en waarvan de productie grotendeels geautomatiseerd is (17). Daarnaast wordt in de automotive industrie al geruime tijd continu-vezelversterking in combinatie met discontinu glasvezelversterkte PP gebruikt in bijvoorbeeld undershields en bumpers (18,19). Recentelijk wordt een aanzienlijke inspanning geleverd in de ontwikkeling van het over-spuitsieten van voorgevormde, geweven, continu-vezelversterkte thermoplasten waarvan enkele (prototype) voorbeelden op de toonaangevende Kunststoffe 2013 beurs in Düsseldorf werden getoond (20,21). Enkele toonaangevende centra voor de ontwikkelingen op automotive gebied zijn te vinden in Duitsland, zoals het AZL, Aachen Center for Integrative Lightweight Production en rondom Fraunhofer ICT, Pfinztal, waarin de industrie en onderzoeksinstituten hun krachten bundelen.

In Nederland loopt baanbrekend onderzoek op het gebied van thermoplastische composieten reeds vanaf de jaren 90 bij de TUDelft, onder andere op het gebied van verwerking, materiaaleigenschappen en verbinden (22-25). Een aantal jaren geleden is ook bij de Universiteit Twente uitgebreid onderzoek op dit gebied gestart, op het gebied van modellering, verwerking en materiaaleigenschappen (26-28). Dit laatste heeft uiteindelijk geleid tot het opzetten van het Thermoplastic composites Research Centre in Enschede, waarvan onder andere de TUDelft, de UT en Saxion deel uitmaken.



Figuur 3: TPC tape placement opstelling

2.4 TPC materiaalontwikkelingen

Parallel aan voornoemde ontwikkeling, is er een duidelijke wisselwerking met ontwikkelingen aan de materialen kant. Gedreven door de technologische mogelijkheden en samenhangende afzetkansen voor materiaal aanbieders, is de laatste jaren een duidelijke trend te zien in de ontwikkeling en beschikbaarheid van nieuwe materialen in het lagere prijs segment. Vooral voor TPC is het materialenaanbod in de laatste jaren aanzienlijk toegenomen, met een snel breder wordend aanbod van vooral continu-vezel versterkte composiet tape en afgeleide halffabricaten, zowel aan de high-end kan als aan de low-end kant, met als interessante kandidaat glas/PP. Het groeiende aanbod van zowel materiaaltype en -kosten als daarmee gepaard gaande technologieën biedt mogelijkheden tot nieuwe toepassingen buiten de reeds meer ontwikkelde sectoren - het onderwerp van het huidige project. Een overzicht van de meest relevante materialen en materiaalleveranciers is te vinden in (29-37).

2.5 3D printen

Naast technologische ontwikkelingen op composietgebied is vanuit een andere hoek een snelle opkomst van nieuwe productietechnologieën, zoals additive manufacturing (in de media en in de industrie vaak 3D printen genoemd), een alternatief voor bestaande productietechnieken (44). Het grote voordeel van deze processen is de vrijwel volledig geautomatiseerde overgang van productidee naar product (CAD) en de hoge mate van vormvrijheid. Dit maakt de techniek uitermate geschikt voor klein-serie productie en gepersonaliseerde producten (44,45). Saxion neemt deel in nationale onderzoeksprojecten op dit gebied en heeft een FabLab in huis, waar deze technologieën

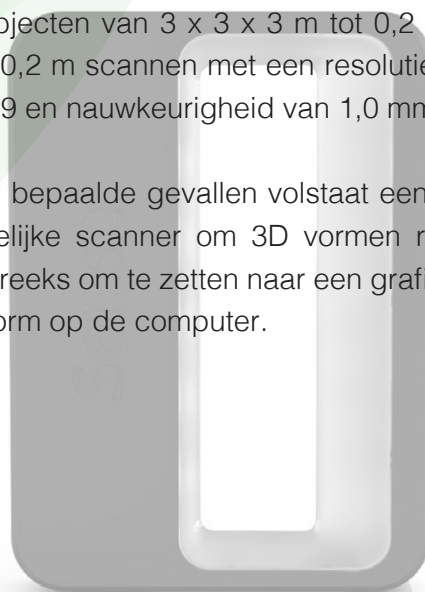
worden toegepast voor bedrijven en individuele gebruikers (46,47).

Eén van de meest gebruikte processen, fused deposition modelling (FDM), dat gebruik maakt van het opsmelten en nauwkeurig afzetten van onversterkt kunststof draadmateriaal, vertoont opvallende gelijkenissen met de hierboven besproken AFP composiet technologie. De combinatie van deze low-cost FDM technologie met toepassing van continu-vezelversterkte thermoplasten, die structurele eigenschappen mogelijk maakt, is veelbelovend.

2.6 3D Scannen

Om 3D geometrieën te kunnen printen met de ontwikkelde technologie, moeten tekeningen gemaakt worden. Door 3D vormen in te scannen, kan het maken van een tekening echter overbodig worden. Tot voor kort was het aanschaffen van een scanner zeer kostbaar (> 10.000 euro). Dankzij de ontwikkeling van steeds slimmere software algoritmes en vereenvoudiging van hardware, zijn in 2015 ook 3D scanners op de markt gekomen die orde-groottes goedkoper zijn, zoals de in dit project gebruikte Sense met een aanschafprijs van 330 euro in 2015. De scanner kan objecten van 3 x 3 x 3 m tot 0,2 x 0,2 x 0,2 m scannen met een resolutie van 0,9 en nauwkeurigheid van 1,0 mm.

In bepaalde gevallen volstaat een dergelijke scanner om 3D vormen rechtstreeks om te zetten naar een grafische vorm op de computer.



Figuur 4: De 'Sense' 3D scanner is eenvoudig en betaalbaar en kan op een reguliere computer worden aangesloten.

3 Nieuwe TPC verwerkingstechnieken

Typische toepassing van thermoplastische composieten is het verwerken van een vezelversterkt halffabricaat. Dit halffabricaat bestaat uit een platte 'tape' uit glasvezel, geïmpregneerd met een smeltbare matrix. Dergelijke tapes zijn in diverse breedtes leverbaar, en bevatten doorgaans continue vezel glas- of koolstofvezels. De matrix kan bestaan uit PP, PE, PA, maar ook relatief dure materialen als PEI, PEKK en PEEK.

3.1 Stand der techniek van TPC

Een veelheid van technieken bestaat om TPC materialen te verwerken. Deze verschillen allen in methode en eigenschappen. De 3DComp technieken zijn in tabel 1 vergeleken met andere continu-vezel verwerkingstechnieken. Deze technieken staan hieronder kort beschreven.

	Snelheid	Nauwkeurigheid	Kostprijs	Kwaliteit	Vormvrijheid
Markforged	-	++	0	++	+
Laser verwarmd tape placement	++	++	--	++	0
Persvormen	0	+	-	++	0
3DComp techniek	++	0	++	+	+

Tabel 1: Overzicht eigenschappen van TPC verwerkingstechnieken.

3.1.1 3D composiet printen met de Markforged technologie

In 2014 is in de Verenigde Staten een 3D printer op de markt gekomen onder de naam MarkForged. Dit is de eerste commercieel beschikbare printer die ontworpen is om continue vezels te verwerken, in combinatie met onversterkt kunststof. De printer plaatst één vezel-filament per gang. Daardoor is de nauwkeurigheid hoog, maar de snelheid beperkt. Ook is de vezelvolumefractie beperkt.

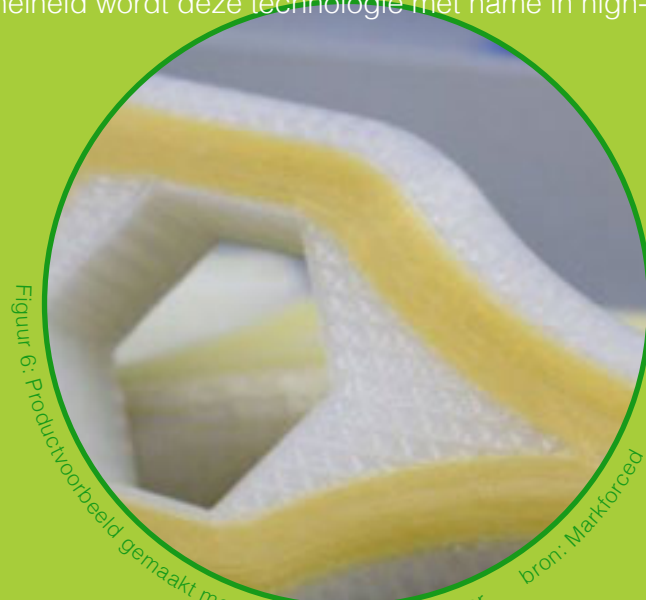
3.1.2 Laser verwarmd tape verwerken

Meerdere tape-placement koppen zijn in de loop der tijd ontwikkeld. Typisch voor tape-placement koppen is het creëren van een laser verwarmd oppervlak om de tape te laten versmelten. Doorgaans worden deze koppen op een robotarm geplaatst. De bereikte snelheden met deze technologie voldoen nog niet op brede schaal aan de behoefte in de industrie. Gezien prijs en snelheid wordt deze technologie met name in high-spec toepassingen zoals aerospace toegepast.



Figuur 5: Markforged printer

bron: Markforged



Figuur 6: Productvoorbeeld gemaakt met de Markforged 3Dprinter

bron: Markforged

3.1.3 Persvormen

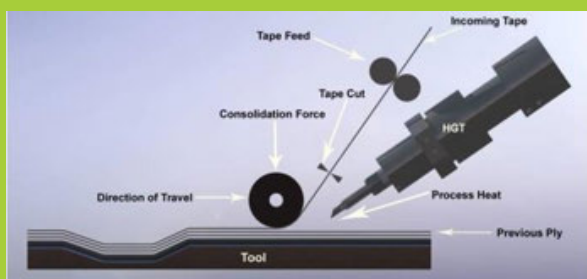
Het persvormen biedt de mogelijkheid om een pakket van materialen te verwarmen en te consolideren bij hogere drukken. Mede vanwege plooi-verschijnselen is de flexibiliteit ten aanzien van geometrie (vormvrijheid) beperkter dan de hierboven genoemde technieken.

3.2 Het low-cost antwoord op tapeverwerking

De belangrijkste drempel voor een groot-schalige doorbraak van de toepassing van TPC materialen zijn kostprijs, snelheid en vormvrijheid, zoals hierboven geschetst. In het 3DComp project is daarom gewerkt aan een low-cost techniek om tape te verwerken, met een hogere snelheid en met meer vormvrijheid. Uitgangspunten daarbij zijn:

- Het aanbrengen van een dikkere vezelbundel met thermoplast (tape) dan de Markforged.
- Het toepassen van goedkope verwarmingstechnieken om het gebruik van lasersystemen overbodig te maken.
- Het aanbrengen van unidirectioneel materiaal in alle richtingen, waarmee meer vormvrijheid wordt verkregen ten opzichte van persvormen.

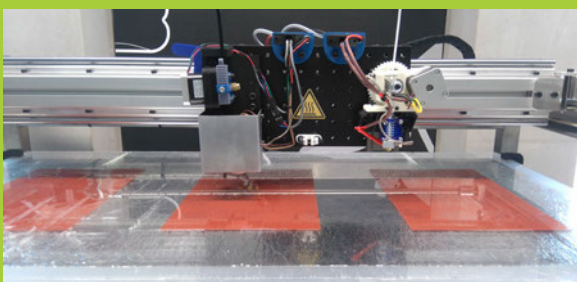
Daartoe is een geheel nieuwe tapekop ontwikkeld. De tapekop is geschikt voor verschillende toepassingen, waaronder 3D Printen, handmatig aanbrengen en wikkelen.



Figuur 7: Werkingsprincipe van laser verwarmd tape verwerken bron: Automated dynamics

3.2.1 3D printtechnologie voor TPC producten

In het 3DComp project zijn positioneringstechnieken gebaseerd op 3D printtechnologie. Verschil met de gebruikelijke 3D printtechnieken is, dat het gelaagd opbouwen van producten alleen mogelijk is, als vezels ook daadwerkelijk 'in het vlak' moeten worden aangebracht, wat voor veel toepassingen niet wenselijk is. Met het oog op deze toepassingen, waarin de vezels ook 'uit het vlak' geplaatst moeten worden, bijvoorbeeld bij (dubbel) gekromde oppervlakken, wordt met de besturing het in de 3D printwereld gebruikelijke 'slicing' vermeden.



Figuur 8: Dual printkop voor het aanbrengen van continue vezels.

Om de tape goed door de printkop te voeren, met name bij start- en stop situaties, is de kop voorzien van een tape-aandrijving. De tape wordt vervolgens met de ontwikkelde cutter afgesneden aan het einde van iedere procesgang.

Speciaal voor het opvullen van plekken waar geen vezels komen, bijvoorbeeld in (esthetische) uitstekende vormen, of om ruimtes tussen niet-evenwijdige vezelbanen op te vullen, is een tweede kop geplaatst die kunststof zonder vezel aan kan brengen (dual-head).

Het printbed is verwarmd (Heated bed) om een snelle afkoeling van het geplaatste materiaal tegen te gaan. Daardoor wordt vervorming als gevolg van krimp verminderd, resulterend in een product met nauwkeuriger vormtoleranties.

3.2.2 Handmatige verwerking en prototyping

Om de toepasbaarheid van TPCs nog eenvoudiger, kosten-effectiever en breder toepasbaar te maken, is een variant ontwikkeld waarmee (kennis van) numerieke aansturing overbodig is. Dit biedt voor sommige toepassingen aanzienlijke voordelen met betrekking tot de snelheid en flexibiliteit. De ontwikkelde 3D printkop is zo eenvoudig en compact, dat een handapplicator is gemaakt waarmee TPC tapes op uiteenlopende ondergronden kunnen worden aangebracht (zie Figuur 9). Meerdere experimenten zijn gedaan met het lokaal verstijven of repareren van niet-vezelversterkte producten, tot aan het maken van prototypen om de haalbaarheid van het maken van vezelversterkte producten in een geautomatiseerde omgeving te analyseren.

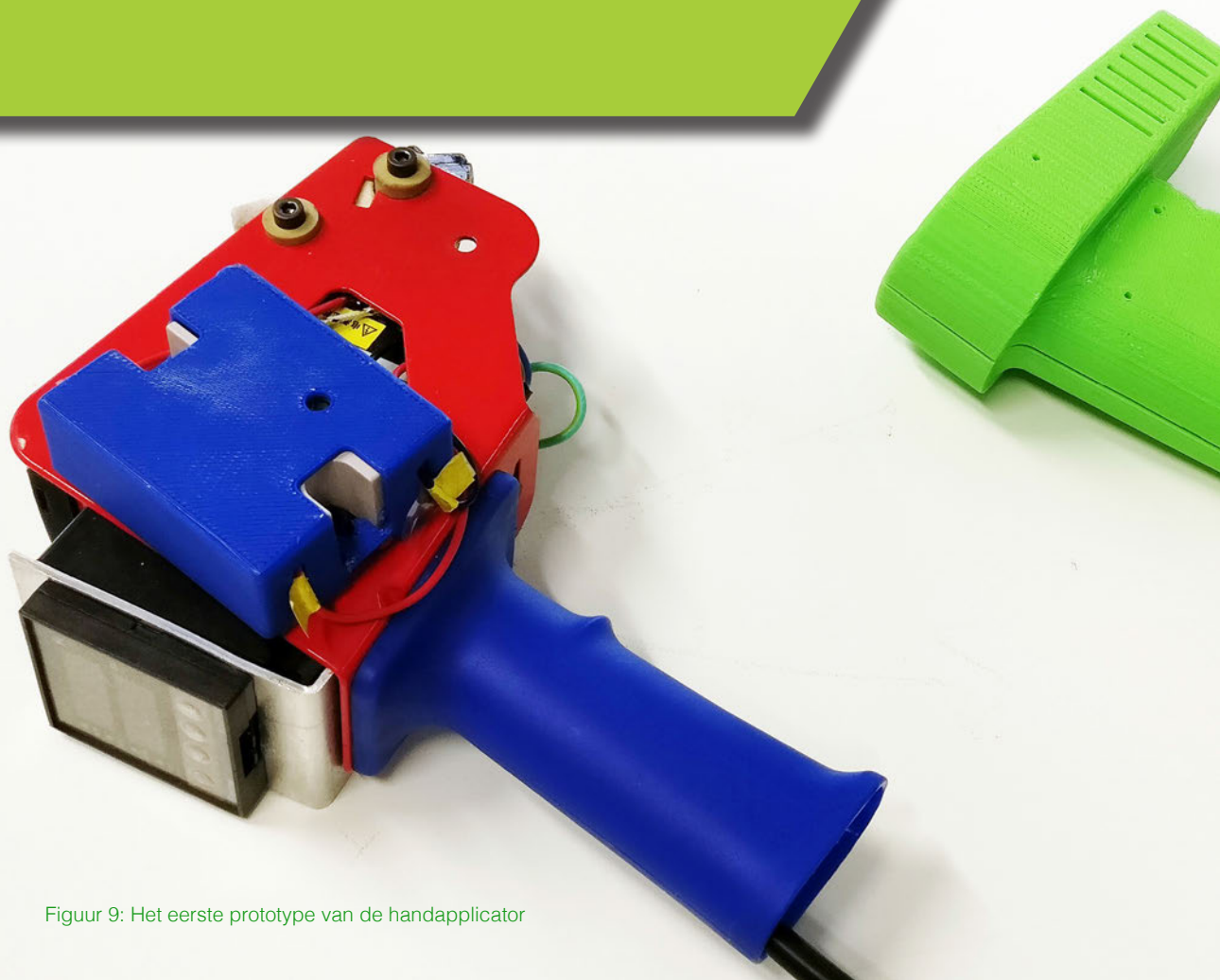
Het gebruik van de ontwikkelde handapplicator blijkt zeer effectief. Gezien haar eenvoud, de lage kostprijs en de flexibiliteit, is een provisional patent aanvraag voor de handapplicator ingediend.

3.2.3 Filament winding en robottechnologie voor TPC producten

Analoog aan voornoemde methoden is de koptechnologie ook toegepast op een wikkelaar en een robot. Juist voor het wikkelen van drukvaten zijn composieten een interessante lichtgewicht oplossing. Met name de extreme flexibiliteit van de robotarm biedt interessante geometrische mogelijkheden. Het lectoraat is voornemens hierop vervolgonderzoek te doen.

3.3 Prestaties van de ontwikkelde processen

Met de ontwikkelde processen zijn vele nieuwe mogelijkheden ontstaan om op kosten efficiënte wijze met goedkope materialen producten te verstijven, en daarmee lichter en goedkoper te maken. Hoewel nog vele zaken onderbelicht zijn gebleven en tot het einde van het project voortdurend nieuwe ideeën ontstonden, wordt hieronder richting gegeven aan de grenzen die momenteel gelden ten aanzien van verwerkingstechnieken.



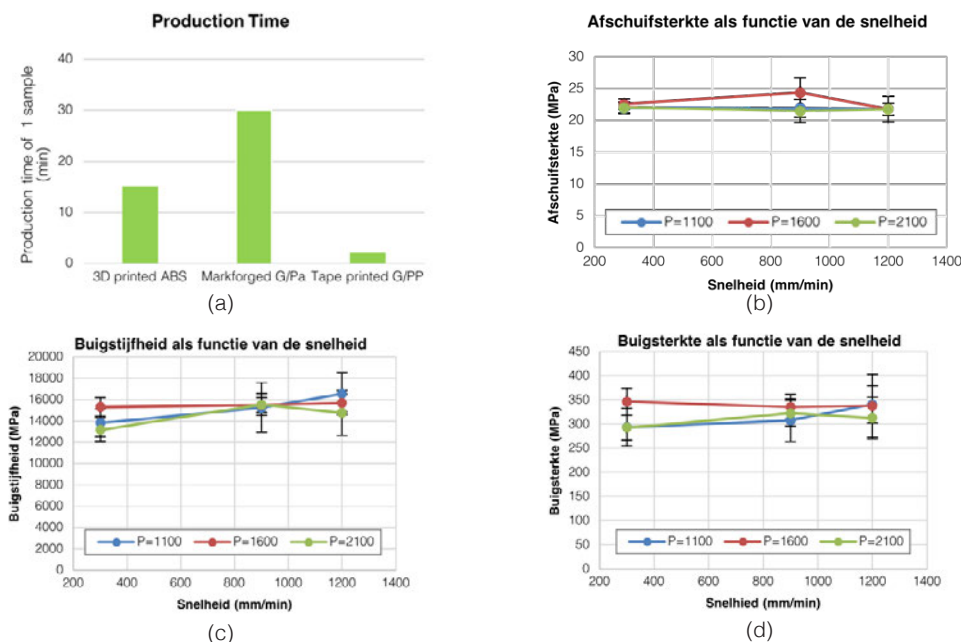
Figuur 9: Het eerste prototype van de handapplicator

Het proces window van de 3Dcomp techniek is onderzocht. De invloed van de belangrijkste variabelen, snelheid en aandrukkracht van de kop is onderzocht met een aantal testen. Onder drie verschillende drukken (1100 t/m 2100 gram) en drie verschillende snelheden (300 t/m 1200 mm/min) zijn proefstaven gemaakt. Van elk type zijn minimaal 5 proefstaven geproduceerd van elk 5 lagen (ongeveer 2mm) dik. Door middel van een 3 punts buigproef (ISO 14125, class III) en afschuivings test (ISO 14130) is de kwaliteit bepaald, zie Figuur 10 voor de resultaten.

De productiesnelheid van de ontwikkelde techniek is hoog in vergelijking met de 3D print methode van Markforged, met name door een hogere volumestroom. In Figuur 10 (a) is het verschil in productietijd zichtbaar. De snelheid van de printkop wordt met name begrensd door drie relaties: printen van bochten met kleine radius (zie 3.4.1 Minimale radius), verhitten in de kop en afkoelen na de kop. Een hogere snelheid geeft het materiaal minder tijd om de temperatuur van de kop over te nemen. Door het verwarmingskanaal van de kop simpelweg te verlengen kan dit opgelost worden. Het afkoelen van de tape na de kop begrenst de minimale snelheid van het proces.

Wanneer de tape te veel afkoelt tussen het verlaten van het verwarmingskanaal en het aanbrengen op het substraat zal het polymeer niet meer hechten. Van Figuur 10 (b) t/m (d) is te zien dat er geen noemenswaardig verschil is bij de geteste snelheden van zowel de buigstijfheid als buigsterkte en de afschuifsterkte. Met name de laatstgenoemde wordt beschouwd als een goede indicatie voor de hechting. Deze resultaten laten zien dat de variabele snelheid tussen 300 en 1200 mm/min geen grote impact heeft op de kwaliteit van het composiet.

Een zelfde soort test is uitgevoerd met verschillende aandrukkrachten (door toepassing van gewichten) van de printkop, resulterend in een hogere druk op het tape, zie tevens Figuur 10 (b) t/m (c). De druk is gemeten door op een weegschaal te printen. Een hogere druk zorgt voor een groter contact oppervlak tussen tape en substraat, met een betere hechting als resultaat. Het idee is ontstaan dat er echter ook een te hoge druk toegepast kan worden. Door een te hoge druk neemt spreiding en daarmee breedte van het tape toe, terwijl de opgeslagen thermische energie in de tape gelijk blijft. De verwachting is dat het oppervlak van het substraat te groot is geworden om door de tape verwarmd te worden tot een temperatuur waarbij voldoende hechting optreedt. Uit de resultaten weergegeven in Figuur 10 (b) t/m (c) blijkt dat de toegepaste druk tussen de 1100 en 2100 gram weinig invloed heeft op de kwaliteit van het composiet.



Figuur 10: Invloed van snelheid op productietijd (a), afschuifsterkte (b), buigstijfheid (c) en buigsterkte (d). (P is gewicht van de printkop, error bar is standaard deviatie)



3.4 Geometrische beperkingen verwerking UD-tape

Ondanks de drie-dimensionale vrijheden kent de ontwikkelde 3D tape printer een aantal geometrische beperkingen. Dit wordt onder andere veroorzaakt door de continue vezels, die bij voorkeur zo min mogelijk onderbroken dienen te worden.

3.4.1 Minimale radius

De vezels in de UD-tapes liggen parallel aan elkaar binnen de tapes. De ontwikkelde tapeprinter kan de tapes in een vlak neerleggen. Aangezien de toevoer van de tape niet met de bochten meedraait, zullen de vezels van de tape gaan overlappen wanneer er bochten geprint worden. Dit brengt een aantal geometrische beperkingen met zich mee met betrekking tot printbare radii.

Figuur 11 laat een geprinte cirkel zien met een radius van 50 mm en een toevoersnelheid (feed) van 500 mm/min. In deze figuur is te zien dat de vezels elkaar overlappen. In Figuur 12 is het verloop van de vezels ook ingetekend. Het printen van een cirkel gaat met deze combinatie van radius en feed nog wel zonder problemen.

Bij een kleinere radius zullen de vezels sneller neigen om 'de bocht af te snijden'. De tape wordt hierdoor van zijn oorspronkelijke lijn getrokken. In Figuur 13 is een deel van een print te zien met een radius van 25 mm en een feed van 120 mm/min. In deze figuur is duidelijk te zien dat een deel van de vezels van de beoogde lijn afwijkt. Om tot een goed resultaat te komen, zal bij het printen goed op de combinatie van feed en radius gelet moeten worden. Bij kleinere radii zal er een lagere feed gebruikt moeten worden, zodat de tape langer de tijd heeft om goed op de laag eronder te hechten en dat het dus ook minder makkelijk kan worden losgetrokken van de beoogde lijn. Na het testen en analyseren van verschillende combinaties van radius en feed is als vuistregel de volgende verhouding tussen feed en radius empirisch vastgesteld:

$$F_{\max} = 4 \cdot R$$



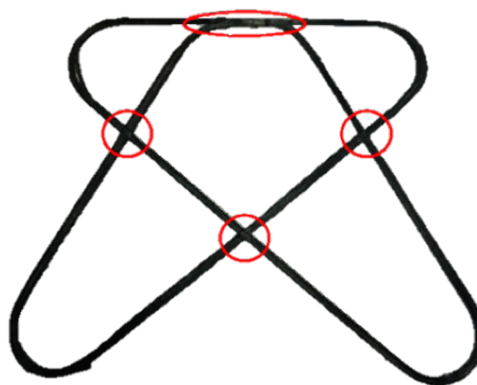
Figuur 11 – Print met radius 50mm en feed 500mm/min



Figuur 12 - Schematische weergave van hoe de vezels lopen



Figuur 13 – Print met radius 25mm en feed 120mm/min



Figuur 14 - Ontwerp voor een krukje

3.4.2 Zo min mogelijk overlappingsen

Aangezien de toevoer van de tape continu is en niet tijdens het printen onderbroken kan worden, moet rekening worden gehouden met het aantal overlappingsen in een print. In Figuur 14 is een ontwerp te zien van een krukje: wanneer dit patroon vele malen op elkaar wordt geprint, zal een krukje ontstaan. In de figuur zijn de overlappingsen van het tape rood omcirkeld. Op deze punten overlapt de tape elkaar binnen één laag. Dit betekent dat elke rondgang in dit patroon op de kruispunten een dubbele laag tape tot gevolg heeft. Hiermee komt er uiteraard ook een verschil in dikte op deze kruispunten. De printkop is ontworpen om oneffenheden te minimaliseren. Echter zullen bij een opeenstapeling van het patroon uit Figuur 14 de dikteverschillen na meer dan tien lagen een niveau halen waar het noodzakelijk wordt om daar in de aanstuuringsfile rekening mee te houden. Dit kan door bijvoorbeeld een kleine afwijking van het originele pad in te bouwen om lokaal de tapes meer te spreiden. Dit is een gebruikelijke methode in bijvoorbeeld het produceren van gewikkelde producten.



Figuur 15: proefstaafjes van verschillende materialen als benchmark.

4 Materiaalkarakterisatie en -validatie

De ontwikkelde technologie heeft laten zien dat vele mogelijkheden ontstaan om op goedkope wijze met goedkope TPCs producten te verstijven, en producten daarmee lichter en goedkoper te maken. In meerdere deelprojecten zijn de prestaties van de verkregen (half-) fabricaten beproefd. Reeds tijdens het project werd duidelijk dat de meetresultaten ook leiden tot nieuwe inzichten en potentiële materiaalverbeteringen. In dit hoofdstuk worden de prestaties van het materiaal behandeld ten aanzien van stijfheid en sterkte, hechting, warpage en milieu-impact.

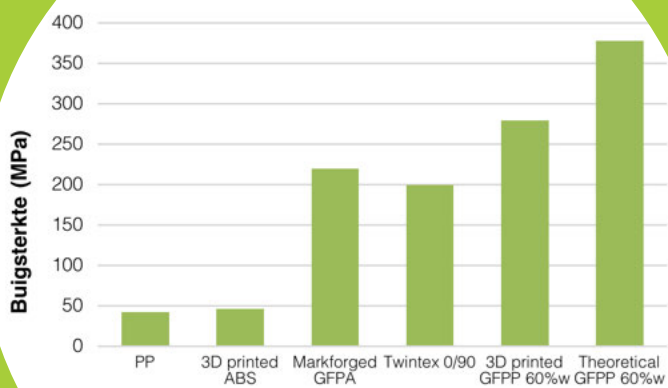
4.1 Stijfheid en sterkte van TPC versterkte producten

Om een indicatie te krijgen van de mechanische prestaties, zijn proefstaafjes uit glas/PP gemaakt met de 3DComp tape printer en vergeleken met proefstaafjes van andere referentiematerialen.

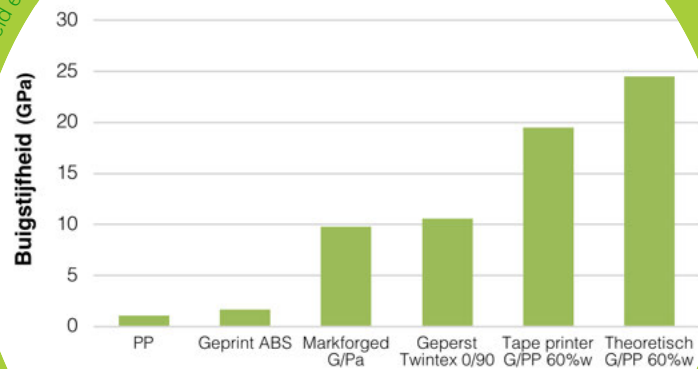
Uit de resultaten van de driepunts-buigproef op deze proefstaafjes blijkt dat de mechanische eigenschappen (zowel buigstijfheid als buigsterkte) van het 60%w Glas/PP met de tape printer gemaakt bijzonder goed presteert.

Uit de proeven kan het volgende worden geconcludeerd:

- Vergelijken met onversterkt PP: door middel van vezelversterking wordt materiaal ruwweg een factor 10 stijver en sterker;
- Vergelijking met Markforged Glass/PA: Ondanks betere eigenschappen van PA wordt de buigstijfheid en -sterkte van het vezelversterkte PA overtroffen doordat de vezelvolumefractie hoger is;
- Twintex is een textiel dat uit glasvezels en PP vezels is gevlochten en sinds jaar en dag de benchmark in kosteneffectieve TPCs. Door dit materiaal te verwarmen en te persen, ontstaat een laminaat van glas-PP. Hoewel het proefstaafje uit hetzelfde materiaal en dezelfde vezelvolumefractie bestaat, wordt de stijfheid toch met een factor 2 overtroffen. Verklaring is dat 50% van het glasweefsel bij Twintex dwars op de belastingsrichting liggen.
- De theoretisch berekende stijfheid en sterkte van 60%w glas/PP blijkt slechts 25% hoger te zijn dan de daadwerkelijk gemeten waarde.



Figuur 16: Stijfheid en sterkte vergeleken met referentie materialen.



4.2 Milieu impact (LevensCyclus Analyse)

In het 3DComp project is vastgesteld dat de toepassing van de TPC glas/PP in veel situaties leidt tot een lagere milieuimpact.

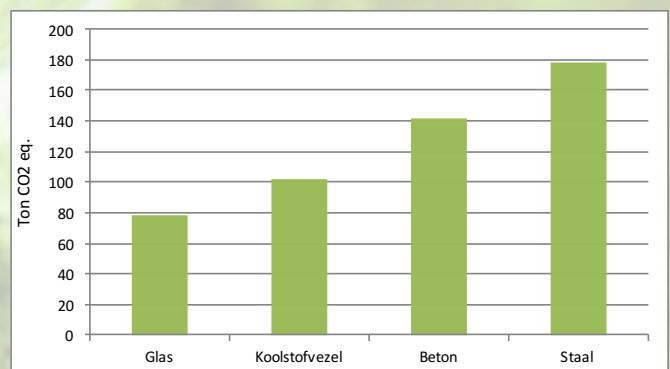
Het potentieel van kunststoffen om CO₂ uitstoot terug te dringen door gewichtsbesparing, maar ook de milieubelasting van deze materialen tijdens de levenscyclus van een product, vragen steeds vaker om een analyse en verantwoording van de milieubelasting. Een veelgebruikte methode voor het vergelijken van milieueffecten van producten over de gehele levenscyclus is de LevensCyclusAnalyse (LCA). Wanneer de totale milieuimpact wordt berekend van 'wieg' tot 'graf' worden de materiaalwinning-, productie-, gebruik- en afdankfase meegenomen in de analyse. Dit leidt tot een veelgebruikte basis voor de objectieve bepaling van milieubelasting, die vaak wordt uitgedrukt in kg CO₂ equivalenten.

Uit verschillende LCA studies blijkt dat vezelversterkte kunststoffen in het algemeen een lagere milieuimpact hebben dan conventionele materialen zoals metalen (38,39). Een aantal factoren speelt daarbij een rol. Zo kunnen composietconstructies lichter zijn dan dezelfde constructies in staal of onversterkte kunststof, de reden waarom in succesvolle toepassingen in de eerste plaats voor deze materialen wordt gekozen. Dit leidt ertoe dat natuurlijke bronnen minder uitgeput worden en bijvoorbeeld transport tijdens de gehele levenscyclus minder belastend is.

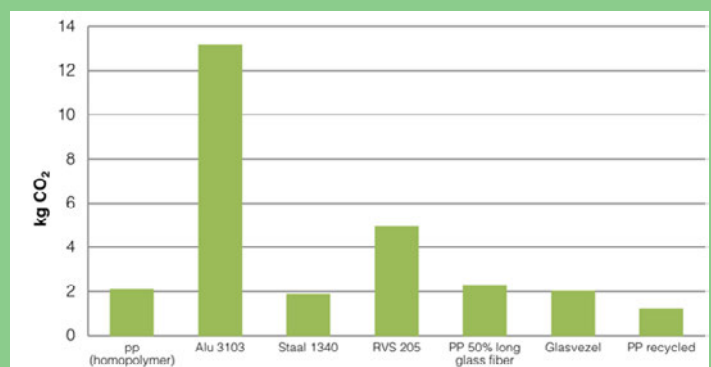
In de gebruiksfase hebben vezelversterkte kunststoffen het grote voordeel dat er vaak aanzienlijk minder onderhoud nodig is, in tegenstelling tot metalen, waar corrosie of de corrosiewerende laag een hoge impact op het milieu heeft (39). Tijdens de productie- en afdankfase scoren thermohardende composieten niet altijd beter dan metalen. Thermoplastische composieten daarentegen, hebben enkele grote voordelen ten opzichte van hun thermohardende equivalent. Tijdens de productiefase is er minder afvalmateriaal, zijn er minder hulpmiddelen die éénmalig gebruikt worden en is er minder gebruik van toxische stoffen, zoals het vrijkomen van styreen bij de verwerking van polyesters.

Ook aan het einde van de levenscyclus hebben thermoplastische composieten voordelen ten opzichte van thermohardende composieten. Zo is laatstgenoemde niet meer om te vormen en daardoor niet, of zeer slecht te recyclen, ondanks vele onderzoekspogingen. Thermoplasten zijn echter te vervormen door ze te verhitten en daardoor a priori beter te recyclen. Bij Saxion zijn en worden meerdere projecten op dit onderwerp uitgevoerd, waaronder het TPC-Cycle project.

Samengevat hebben thermoplastische composieten naar verwachting een lagere milieu impact dan alternatieve materialen als metalen, beton en thermohardende composieten in product toepassingen, en hebben daarmee een positief discriminerende eigenschap vanuit milieu perspectief. Dit is schematisch weergegeven in figuur 5, waarin de totale levenscyclus (realisatie, onderhoud, reparatie en afdanking na 100 jaar) van een 12 meter lange brug is vergeleken met alternatieven. De composiet brugvarianten scoren beiden significant beter dan beton en staal, wat broeikasgasemissie en klimaatverandering aangaat.



Figuur 17: LCA analyse 'cradle-to-grave' van een brug uit verschillende materialen (42, 43)



Figuur 18: Milieu impact van productie per kg materiaal
Bron: CES Edupack, Ecolnvent v2.2

Vlonderplankverstijving Gampet met TPC

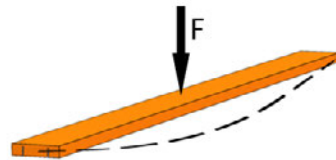
Binnen het 3D COMP project is er door het lectoraat Industrial Design een levenscyclus analyse (LCA) uitgevoerd op de case van een Vlonderplank verstijving van het bedrijf en partner Gampet Products. In de LCA wordt de impact op het milieu van een product uitgerekend, gedurende de gehele levenscyclus. Hiermee kan worden bepaald of thermoplastische composieten vanuit milieuoogpunt een betere keuze zijn.

Gampet Products levert producten van gerecycled kunststof, waaronder vlonderplanken (Zie Figuur 20). Wanneer deze planken ingezet worden voor grote overspanningen, meer dan 660 mm, dan worden de planken verstijfd. Deze verstijving wordt vooralsnog gerealiseerd door twee banen uit de onderkant van de plank te frezen en deze op te vullen met stalen strips (P1), of glasversterkte polyester composieten strips (P2), zie Figuur 20. De planken zijn 3 meter lang en hebben een doorsnede van 200 x

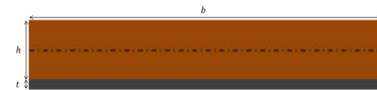
In het 3DCOMP project is onderzocht of deze verstijving ook gerealiseerd kan worden door glasversterkte PE tape (P3) onder de vlonderplank aan te brengen, Figuur 21; door de verstijving aan de zijkanten (P4), Figuur 22, of als sandwich constructie (P5) mee te nemen is een grote reductie van materiaal mogelijk. Echter is tape aanbrengen aan de zichtzijde niet wenselijk.

Doel van deze analyse is verschillende varianten vlonderplanken te vergelijken, om inzicht te krijgen in welke variant de laagste milieu-impact heeft. De functionele eenheid is: een overspanning met vergelijkbare buigstijfheid, geproduceerd en onderhouden voor 15 jaar. Daarnaast zijn de systeemgrenzen van deze analyse de materiaalwinning, productie, transport en afdanking van de steigerplank. De gebruiksfase is niet van toepassing, omdat er bij alle drie varianten geen onderhoud nodig is en het een statische toepassing betreft. De milieuimpact is berekend voor de verschillende vlonderplanken en weergegeven in Figuur 23 voor de totale levenscyclus en in Figuur 24 voor de impact per fase. Product 2 (versterkt polyester) heeft de hoogste milieuimpact. Product 1 (metaal) en 3 (PEGF tape) zijn vergelijkbaar wat betreft milieuimpact. In elke variant heeft de materiaalwinning, zoals verwacht, duidelijk de grootste milieuimpact.

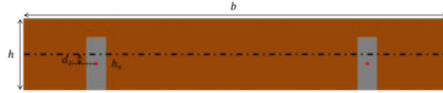
Echter, door de PEGF tape aan de zijkant of als sandwich te plaatsen, is een drastische materiaalbesparing te realiseren waardoor de milieu impact fors lager wordt, zie Figuur 23. Daarnaast biedt de methode voor het aanbrengen van PEGF de mogelijkheid om het volume van de hoeveelheid aangebrachte versterking aan te passen op de toepassing, waardoor het materiaalgebruik geoptimaliseerd en daarmee de milieuimpact geminimaliseerd kan worden.



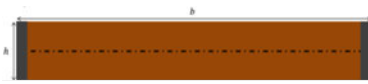
Figuur 19: Vlonderplank onder belasting



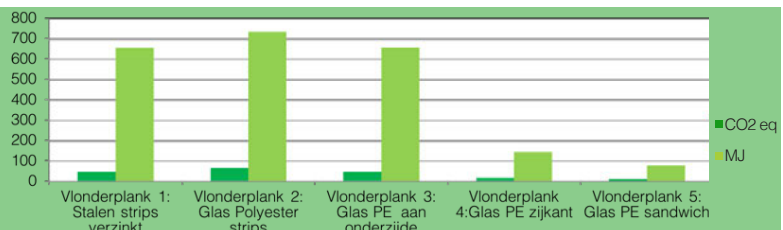
Figuur 21: Doorsnede P3 versterkt met TPC



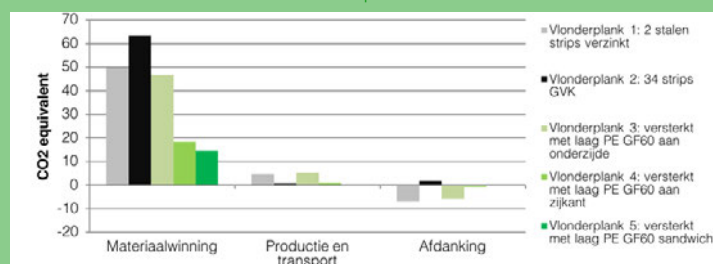
Figuur 20: Doorsnede P1 versterkt met staal of P2 glasvezel versterkt polyester



Figuur 22: Doorsnede P4 versterkt met TPC (PEGF60) Zijkant



Figuur 23: Milieu impact van totale levenscyclus voor de verschillende vlonderplanken



Figuur 24: Milieu impact per fase

5 Praktijkcases

Met de hierboven beschreven technologie is toegepast onderzoek verricht naar verschillende industriële processen door middel van multidisciplinaire Living Technology teams, stage- en afstudeeropdrachten in samenwerking met de partner-bedrijven. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze praktijkcases samengevat.



Figuur 25: Prothese



Figuur 26: Prothese versterkt met TPC tape



5.1 Protheseversterking

Bedrijf: Roessingh Revalidatie Techniek B.V.

In samenwerking met Roessingh Revalidatie Techniek (Hierna: RRT) zijn meerdere onderzoeken verricht naar het verstijven van prothesen. Het doel hiervan was het onderzoeken van een nieuw productieproces voor transtibiale prothesen (TT-prothese) en enkel voet orthoses (EVO's).

Door middel van filament winding en het gebruik van thermoplastische composieten, werd gezocht naar een aantrekkelijker manier om TT-prothesen en EVO's te maken. Daartoe is de eerder gemaakte wikkelmachine aangepast.

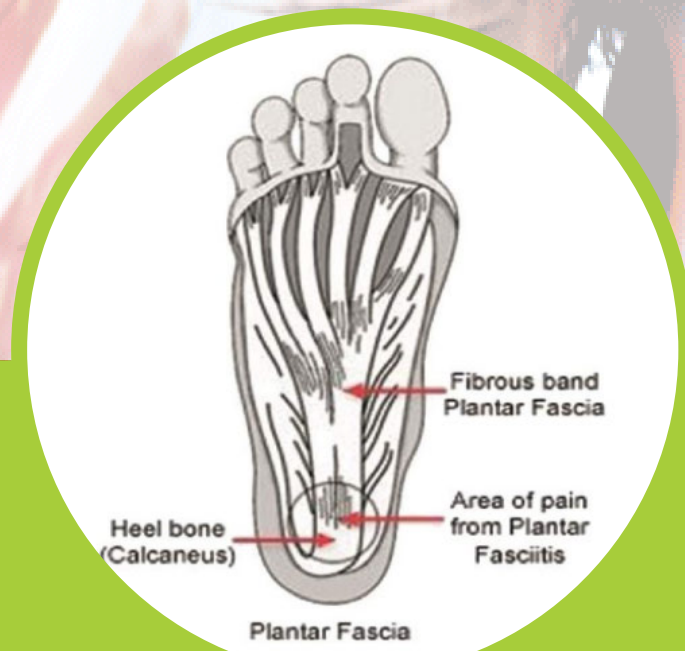
Na een inventarisatiestudie zijn verschillende concepten ontwikkeld en beproefd: onder meer zijn hechting-testen uitgevoerd. Uit de verzamelde gegevens zijn zes idee-

en ontstaan, die verder uitgewerkt en gecombineerd zijn tot een totaal van drie eind-concepten. Er zijn meerdere prototypes gemaakt en er is een aantal prothesen en orthoses van RRT op meerdere aspecten getest met behulp van de trekbank. Uit de testen is gebleken dat de TPC versterkte orthese een vergelijkbare sterkte heeft als de bestaande orthoses.

In een vervolgtraject is vervolgens onderzoek verricht naar het 3D inscannen en daarna 3D printen van een prothese. Door deze 3Dgeprinte prothesekoker vervolgens te omwikkelen met TPC tape, ontstaat een veelbelovend proces om prothesen met thermo-plastische composieten te maken.



Figuur 27: De ontwikkelde X-brace



Figuur 28: Fasciitis plantaris

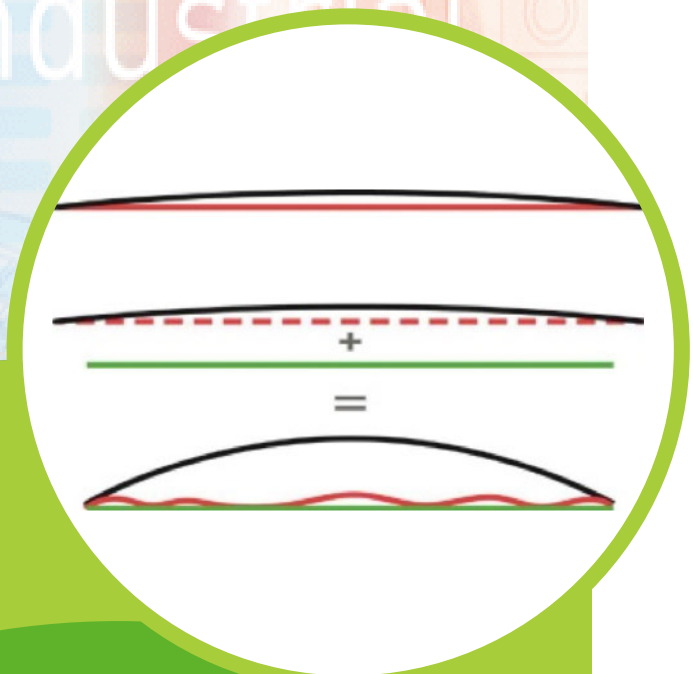
5.2 Ortheseverstijving

Bedrijf: Aert Bakker

In dit project is onderzoek verricht naar de verstijving van steunzolen ter behandeling van fasciitis plantaris (FP). FP is een ontsteking van de peesplaat, onder de voet, en kan in een verder stadium doorgroeien tot een hielspoor (verkalking van de peesplaat bij de aanhechting aan het hielbeen). Totnogtoe worden voor de behandeling plakband-tapes toegepast, maar deze kunnen bij patiënten met een gevoelige huid een allergische reactie veroorzaken. Doel van dit project was daarom om een product te ontwikkelen dat gebruikt kan worden voor de behandeling tegen fasciitis plantaris, waarbij geen complicaties optreden en de patiënt geen problemen ondervindt in het dagelijks leven. Uit het literatuuronderzoek bleek dat FP vooral voorkomt bij sporters, mensen met overgewicht en

mensen in de leeftijdscategorie van veertig tot zestig jaar. Patiënten zijn over het algemeen bereid om €450,- te betalen voor de behandeling van FP. Meer dan 80% van de patiënten geneest binnen twaalf maanden van de aandoening.

Er zijn verschillende producten op de markt, waarvan wordt geclaimd te helpen bij het verlichten van de pijn bij FP of een hielspoor. Deze zorgen echter niet altijd voor een pijnvrije ervaring. Door het gebruik van inlegzooltjes en hielzooltjes is de kans aanwezig dat de stand van de voet verandert en dat de achillespees verkort. Wanneer men echter met tape behandeld wordt, zou een zooltje wel een aanvullend effect kunnen hebben om de pijn nog meer te verlichten.



Voor het project zijn verschillende prototypen gemaakt. Door het aanpassen van de ongewenste eigenschappen, gebleken uit verschillende testen, is uiteindelijk een eindproduct ontworpen. Dit eindproduct heeft de naam X-brace gekregen (zie Figuur 27). Door de voetboog in de lengterichting te ondersteunen, zal de patiënt in staat zijn zonder (noemenswaardige) pijn te kunnen lopen. Tevens zorgt de X-brace er voor dat onder de hiel een samengedrukte huidplooi ontstaat waarmee de patiënt zelfs bij een hielspoor op de hiel kan steunen en lopen. De strakke pasvorm zal ervoor zorgen dat het voorste deel van de voet dicht naar de hiel toe wordt getrokken. Hierdoor wordt de peesplaat ontlast van spanning. Een combinatie van de bovengenoemde effecten zorgt ervoor dat de patiënt directe pijnverlichting ervaart wanneer de brace correct gedragen wordt.

Als aanvulling op de X-brace zijn siliconen hielzooltjes ontwikkeld. Het doel van deze hielzooltjes is het creëren van een nog dikkerre huidplooi onder de hiel, wat de patiënt extra pijnverlichting biedt. Een nadeel van het materiaal is dat het materiaal geen stijfheid bezit. Omdat het zooltje een 'hoefijzervorm' heeft, is enige stijfheid noodzakelijk. Dit is opgelost door tijdens het gietproces gevormde inserts van composietmateriaal in de mal te plaatsen. De stijfheid van het composiet zorgt voor vormvastheid van het siliconen zooltje, zonder dat de werking en het comfort verloren gaan. Op deze manier zijn de hielzooltjes een goede aanvulling op de brace. De X-brace is in de praktijk van Aert Bakker door een hielspoorpatiënt getest. Het resultaat van de test is dat het product zorgde voor directe pijnverlichting. Bovendien werd het product als zeer comfortabel ervaren door de patiënt.



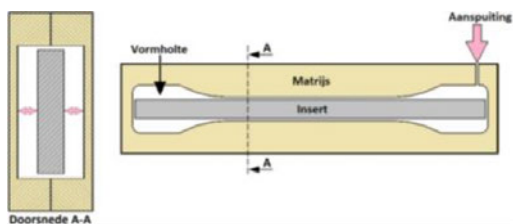
5.3 *Spuitgietinserts* Bedrijf: **Timmerije B.V.**

Om een spuitgietproduct sterker en stijver te maken, kan de geometrie aangepast worden of kan het materiaal verstevigd worden door glasvezels toe te voegen. Geometrische verstijvingen leiden bijvoorbeeld tot de keuze voor grotere wanddiktes of verstijvingsribben. Door glasvezels toe te passen kan materiaal en soms ook cyclustijd worden bespaard.

Continu glasvezel wordt momenteel in sommige producten toegepast zoals op maat gesneden weefsel. Daarmee ontstaan snij-verliezen en bovendien worden daardoor ook vezels aangebracht op plekken waar het niet noodzakelijk is. Bovendien is inpassing in bestaande processen niet eenvoudig zonder aanzienlijke investeringen. Een ideale situatie zou zijn als een kunststof product plaatselijk versterkt wordt op de plek waar hoge spanningen in het materiaal optreden. Dit kan zorgen voor mogelijke kostenbesparingen, meer ontwerpvrijheid, gewichtsbesparingen en betere mechanische prestaties van kunststoffen producten.

In deze afstudeeropdracht is een eerste stap gemaakt in een onderzoek naar de mogelijkheid om een spuitgiet product plaatselijk te verstevigen. Daartoe is eerst onderzoek gedaan naar eerdere projecten op dit gebied. Vervolgens zijn twee testseries uitgevoerd. Bij deze tests zijn verschillende verstijvingen aangebracht in spuitgietproducten. De verstevigingen bestonden uit stukjes unidirectioneel composietmateriaal, hier verder 'inserts' genoemd, die in de spuitgietmatrijs geplaatst konden worden. De inserts werden vervolgens in zijn geheel of gedeeltelijk omspoten met kunststof. Het composietmateriaal bestond uit glasvezels met een thermoplastische matrix.

In de eerste testserie zijn verschillende typen TPC inserts in trekstaafjes verwerkt. In de tweede testserie zijn TPC inserts verwerkt in een product dat het spuitgietbedrijf Timmerijne al langere tijd levert aan één van haar klanten. Het doel van de twee testseries was om te bepalen wat de belangrijkste factoren zijn bij het verwerken van TPC inserts in spuitgietproducten. Voor dit project werden inserts door middel van de ontwikkelde 3D printer in de juiste vorm geprefabriceerd.



Figuur 29: De vormholte van de matrijs met daarin de insert. Rechts een aanzicht haaks op de deellijn van de matrijs. En links doorsnede A-A van de totale matrijs.

Tijdens de tests bleek de toepassing van de TPC inserts mogelijk, zonder enige toepassing aan matrijs of proces. Wel bleek dat de inserts nauwkeurig vormgegeven moeten worden, omdat deze anders beschadigen en/of vervormen tijdens het sluiten van de matrijs. Als een insert beschadigd is, kan de positie in het product niet meer gewaarborgd worden.

De geometrie en de plaatsing van de insert heeft verder, zoals verwacht, een grote invloed op hoe het product kromtrekt na het afkoelen (warpage). Het blijkt dat de trekstaven (eerste proeven) niet meer kromtrokken wanneer de middellijn van de inserts op dezelfde lijn lag als de middellijn van de trekstaaf.

Hoe sterk en stijf een spuitgietproduct wordt na het plaatsen van composiet inserts, verschilt sterk per product. Als in

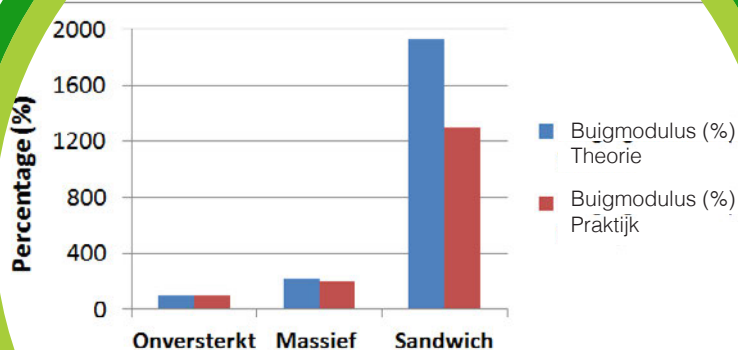


Figuur 30: Niet-symmetrische trekstaafjes met insert.

een trekstaaf een insert geplaatst wordt, blijkt de buigmodulus met meer dan 90% toe te nemen en de buigsterkte met bijna 80% ten opzichte van een onversterkte trekstaaf. De sterkte en stijfheid van de geteste spuitgietproducten bleken ook toegenomen bij integratie van de TPC inserts, ten opzichte van de onversterkte variant.

Het onderzoek zal worden voortgezet door nieuwe inserts te maken waarbij meer aandacht besteed wordt aan hoe de inserts nauwkeurig aangebracht kunnen worden. Ook moet gekeken worden of het vervormen tijdens afkoelen van de versterkte producten verder teruggebracht kan worden.

Ten slotte moet meer onderzoek verricht worden naar een nauwkeurige en efficiënte manier om inserts tijdens het inspuiten van kunststof te fixeren.



*De theoretische waarde van de onversterkte trekstaaf is genomen als 100%

Figuur 31: Vergelijking van de 3 testseries van de buigmodulus (N/mm²) en de buigsterkte (N/mm²).



5.4 Kruipvermindering in PA met gietinsterts **Bedrijf: Quadrant Engineering Plastic Products**

Één van de vele kunststof producten die door Quadrant worden geleverd, zijn kabelschijven die onder andere op grote (off-shore) hijsinrichtingen worden geïnstalleerd. Deze schijven worden gegoten uit monomeer en gepolymeriseerd tot een PA6 product. Kabelschijven kunnen een diameter van wel enkele meters hebben, en worden vanwege de extreme belastingen doorgerekend voor iedere specifieke toepassing.

De maximale belastbaarheid van het materiaal wordt op dit moment beperkt door kruipgedrag bij langdurige hoge belastingen. Ingeval kruipgedrag wordt voorzien, wordt momenteel in het asgat een stalen bus aangebracht. Nadeel hiervan is, dat daarmee het gewicht en ook de kostprijs van de kabelschijf toeneemt, hetgeen niet wenselijk is bij bijvoorbeeld hoge offshore-kranen.

De vraag in dit project is of met vezelversterking het toepassen van een stalen asgat overbodig kan worden. In dit project is daarom onderzoek verricht naar het versterken van kabelschijven met behulp van continu vezel inserts met PA6 als matrix. Daartoe zijn verschillende inserts ontworpen en met de 3DComp technologie geproduceerd. Deze inserts werden vervolgens meegegoten in testproducten. De producten werden daarna onderworpen aan kritische mechanische tests.

Om een uitspraak te kunnen doen over de prestaties en optredende verschijnselen van het ingieten van inserts met PA6, zijn eerst vier typen samples gemaakt en beproefd: onge vuld, staal versterkt, vezelversterkte ringen en vezelversterkte lussen.

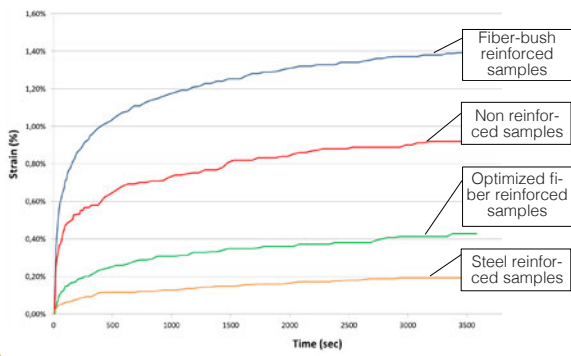
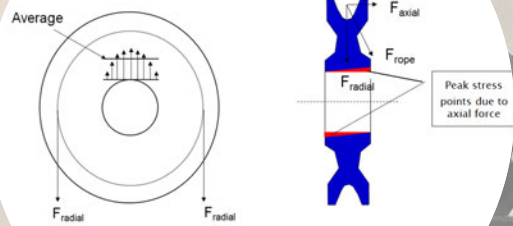
De resultaten laten zien dat continu vezelversterkte inserts een mogelijkheid bieden om kabelschijven te versterken. Aanbevolen wordt om vervolgonderzoek te doen naar productietechnieken en rekenmethoden om de inserts toepasbaar te maken in de praktijk.



Figuur 32: Kabelschijven van PA6



Figuur 33: optredende krachten in kabelschijven.



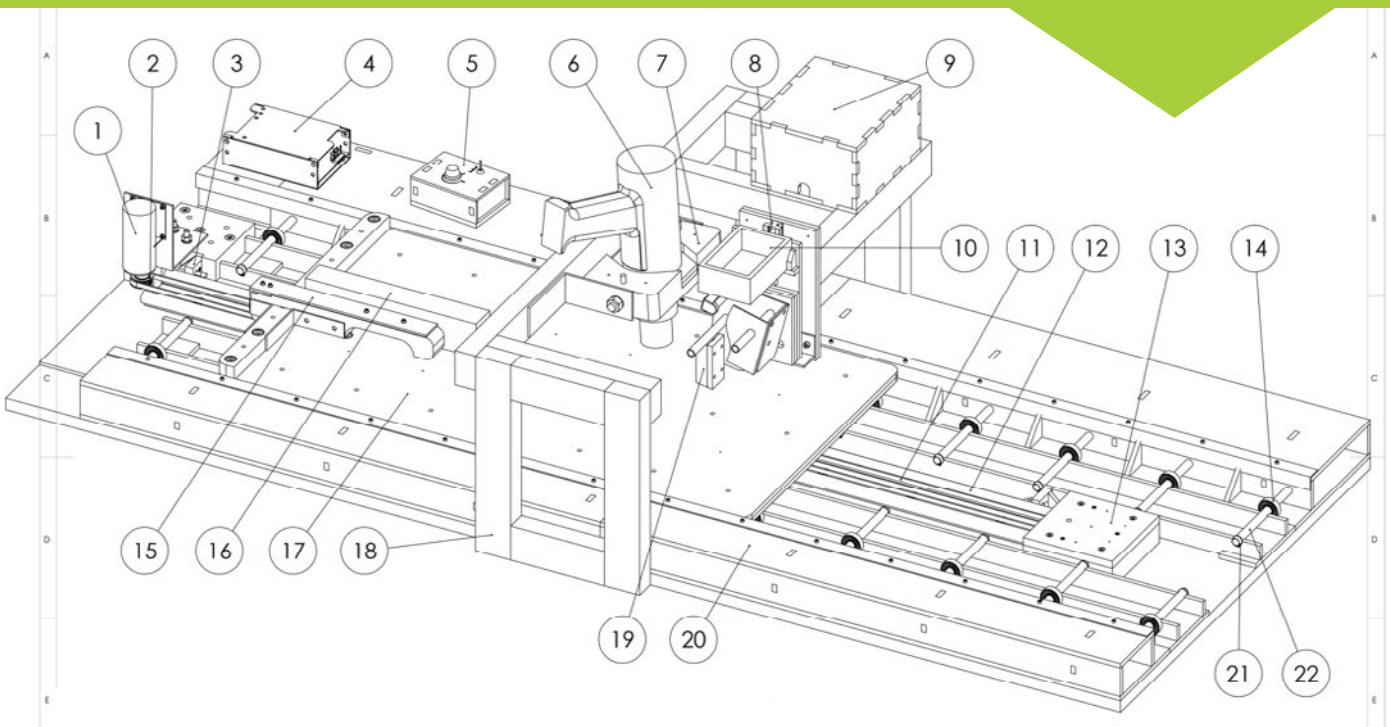
Figuur 34: kruip van verschillende kabelschijven

5.5 Post-process verstijving van gordingen

Bedrijf: Gampet Products B.V.

Kunststoffen worden steeds meer gerecycled. De industrie is in staat gebleken om de kwaliteit van kunststof recyclaten steeds verder te verbeteren. Toch blijft een reststroom bestaan van retourstromen met een zeer lage kwaliteit. Van deze stromen worden onder andere gordingen geperst en worden ze door Gampet een nieuwe toepassing gegeven.

Nadeel zijn echter de matige mechanische prestaties. Producten als steigerplanken en lantaarnpalen bestaande uit dit materiaal buigen makkelijk door of trekken krom als gevolg van uitzetting bij temperatuurverandering. In dit project is onderzocht hoe deze producten versterkt kunnen worden, zodat kromtrekken en doorbuigen wordt tegengegaan. Daartoe zijn TPC tapes op het oppervlak van gordingen aangebracht.



Figuur 35: Steigerplanken van laagwaardig recyclaat buigen makkelijk door.

Onderzoek is verricht naar de invloed van procescondities op de hechting van de tapes op het substraat. Daarmee is vastgesteld onder welke procescondities een goede hechting van tape op de gordingen plaatsvindt.

Vervolgens zijn metingen gedaan naar de stijfheidstoename van vezelversterkte gordingen. Zoals verwacht, neemt de stijfheid van versterkte gordingen aanzienlijk toe. De verwachting is, dat ook het kruipgedrag significant wordt verminderd door vezelversterkte tapes toe te passen. Aanbevolen wordt om hier in een vervolgonderzoek nader aandacht aan te besteden.



Figuur 36: Doel is het beperken van doorbuigen door aanbrengen van glasvezels.

Figuur 37: Detailopname van een gording voorzien van TPC tape.



5.6 Vezelversterkt plaatwiel voor fietsen

Bedrijf: Flevobike

In dit onderzoek is gewerkt aan het project Armadillo. De Armadillo is een cargobike die een 2 m³ container vervoert. De container is ontwikkeld door Flevobike in samenwerking met DHL. Het doel van de cargobike is het snel en eenvoudig vervoeren van pakketjes in drukke binnensteden. Door het formaat en de wendbaarheid van de Armadillo biedt deze fiets grensverleggende flexibiliteit.

Om het gewicht van de fiets verder te reduceren, is gewerkt aan de ontwikkeling van composiet sandwich wielen. De wielen met honingraat kern kunnen licht maar toch zeer stijf zijn, waardoor ze zorgen voor goed rijgedrag en tegelijkertijd kunnen ze zware belastingen aan.

Uit beproeving met het sandwichwiel bleek, dat verdere verstijving noodzakelijk is. Glas-PP tape dient onder de flenzen te worden aangebracht. Om stijfheid in het vlak te verhogen, kunnen tapes radiaal worden aangebracht, hetgeen een mogelijk onderwerp is voor vervolgonderzoek.



Figuur 39: Prototype van het composiet sandwich wiel



Figuur 38: Prototype van de Armadillo Cargofiets

5.7 Vezelversterking in rotatiegietproducten

Bedrijf: Pentas

Het idee om kunststof producten met vezels te verstijven is ook toegepast op een rotatiegiet proces. Hiermee kan de stijfheid /sterkte van een product aanzienlijk verhoogd worden, zonder dat dit een toename in wanddikte en dus cyclustijd, gewicht en materiaal- en proceskosten tot gevolg heeft. Daarnaast kunnen eigenschappen gehaald worden, die met onversterkte kunststoffen niet mogelijk zijn.

Ook in dit project is ervoor gekozen om op labschaal proefproducten te maken, omdat omstandigheden daarbij beter gecontroleerd kunnen worden en productie niet verstoord hoeft te worden.

De proeven toonden aan dat het mogelijk is om TPC inserts te integreren in het rotatiegietproces zonder noemenswaardige aanpassingen. Een toename van mechanische eigenschappen is waargenomen, door het gebruik van de TPC inserts. Het effect van krimpverschillen tussen de TPC inserts en het omringende kunststof is te voorkomen door de juiste keuzes van de geometrie van de TPC insert.



Figuur 41: Verschillende producten, met en zonder vezelversterking, vervaardigd met rotatiegieten



Figuur 40: De labopstelling waarmee proefproducten in een oven gegoten kunnen worden.

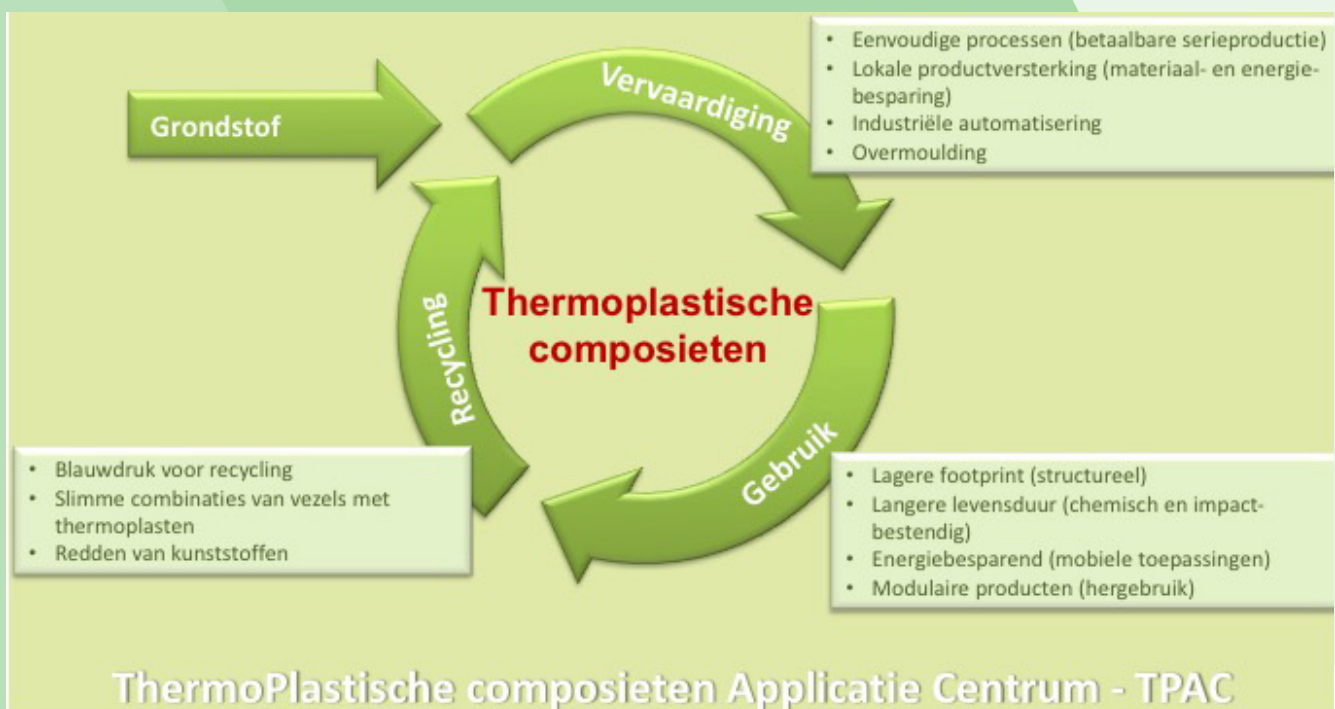
6 Toekomstige ontwikkelingen met TPC materialen

6.1 TPC in de circulaire economie

Een belangrijk bestaansrecht van thermoplastische composieten betreft het enorme potentieel om gewicht te besparen. Dat leidt regelrecht tot significante energiebesparingen in mobiele toepassingen, zoals in het bijzonder transport(hulp) middelen. Vanuit het perspectief van een circulaire economie bezien, is TPC veelbelovend, maar is nog wel toegepast onderzoek nodig naar meerdere aspecten in de circulaire keten. Daarom richt het lectoraat LC zich op knelpunten in de circulaire TPC keten, zoals in onderstaande figuur geschetst.

Het onderzoek bij het lectoraat Lichtgewicht Construeren richt zich op zwaartepunten in iedere fase van de levenscyclus van TPC producten, zoals:

- Grondstof: Ontwikkeling van TPC met matrix uit recycalaat, Compensatie van verontreinigingen met vezelversterking.
- Recycling: Ontwikkeling van recyclingprocessen voor TPC.
- Vervaardiging: Low-cost productie uit low-cost materialen en overmoulden met ultra lage dichtheid kunststoffen.



Figuur 42: Zwaartepunten van TPC onderzoek bij het lectoraat LC

6.2 Sectorprognose

De milieuvoordelen van TPC (o.a. materiaal efficiënte productie, gewichtsbesparing, corrosiebestendigheid), tezamen met verwerkbaarheid en potentiële kostenreductie krijgt steeds meer de aandacht uit de industrie. Na de enorme groei in luchtvaarttoepassingen van high-end processen en –materialen, staan goedkopere TPC materialen steeds meer in de belangstelling van de automotive industrie. Inmiddels bestaan meerdere producenten van low-cost tapes gebaseerd op glasvezel met een commodity matrix als PP of PE. De prijs van deze materialen begint intussen in dezelfde ordegrottes te komen als die van de meeste thermoplasten en de verwachting is, dat deze prijs verder kan dalen indien de verkochte volumes in de markt zullen toenemen. Hiermee worden TPC prijstechnisch interessant voor toepassing in (kunststof) producten.

De (kosten van) verwerkbaarheid van TPC materialen is daarbij nog steeds een drempel voor vele toepassingen, maar de stappen die hierin gezet worden zullen op termijn naar verwachting leiden tot een doorbraak. Een belangrijke factor zullen daarbij de ontwikkelingen van robotisering zijn.

Met de ontwikkelingen in het 3DComp project is aangetoond dat ook voor geheel andere toepassingen van kunststofproducten tegen zeer lage kosten oplossingen kunnen bestaan met semi-geautomatiseerde toepassingen van TPC materialen. De belangstelling van de 3DComp partners onderstreept dit. Wij zullen als lectoraat blijven doorontwikkelen aan deze veelbelovende technologie.

6.3 Het lectoraat Lichtgewicht Construeren

Naast de in dit rapport genoemde resultaten heeft het 3DComp geleid tot een verdere ontwikkeling van het lectoraat Lichtgewicht Construeren. Tijdens het project is een TPC lab ingericht en zijn vele apparaten gekocht of ontwikkeld om toegepast onderzoek te kunnen verrichten op het gebied van thermoplastische composieten. Mede hierdoor lopen inmiddels meerdere samenwerkingsprojecten met het MKB, waarin onderzoek wordt gedaan naar:

- Overmoulding met spuitgieten.
- Recycling van low-cost / high volume TPC materialen.
- Recycling van high-end / low volume TPC materialen.
- Continu vezel oplossingen in combinatie met recyclaten.

In de toekomst wordt verwacht dat hieraan verdere bedrijfsprojecten toegevoegd zullen worden op het gebied van:

- Flexibel produceren met TPC.
- Verbeterde verwerkingstechnieken TPC (i.h.b. geschikt voor grootserie).
- Inpassen van TPC processen in automatische procesketens / Volautomatisch produceren van TPC.
- Verbeteringen (waaronder ontwikkeling van fixatietechnieken) voor overmoulden.
- Hechten en verbinden van TPC productdelen.

Om kennisverspreiding en toepassingen te vergroten, wordt gewerkt aan het inrichten van een ThermoPlastisch composieten ApplicatieCentrum (TPAC), een samenwerking tussen TPRC en Saxion. Het TPAC beoogt een intensieve samenwerking met MKB's die interesse hebben in de toepassing van TPC's in hun producten, om gezamenlijk via toegepast onderzoek tot product-verbeteringen commercieel haalbare toepassingen te komen.

Bijlage 1: Projectpartners

Dit project is mede tot stand gekomen dankzij de hulp van de volgende projectpartners:

Aert Bakker Praktijk voor Manuele Geneeskunde

Aert Bakker
J J van Deinselaan 18, ENSCHEDE
a.bakker@saxion.nl

DimmenZ, Dynamic Dimensions

Marjan van Lambalgen
Driebelsterweg 3, MARKELO
info@dimmenz.nl

Flevobike Technology VoF

Johan Vrielink
De Drieslag 1, DRONTEN
johanvrielink67@gmail.com

Gampet Plastics B.V.

Bram Peters
't Goor 41, ULFT
bram.peters@gampet.nl

Lichtweight structures B.V.

Aldert Verheus
Rotterdamseweg 402H, DELFT
aldert.verheus@lightweight-structures.com

Pentas Moulding B.V.

Ruud Koorn
Bedrijvenpark Twente 122, ALMELO
r.koorn@pentas.nl

Saxion University of Applied Sciences

Dr ir. Ferrie van Hattum
M.H. Tromplaan 28, ENSCHEDE
Lectoraat Lichtgewicht Construeren
f.w.j.vanhattum@saxion.nl

Phantom Assets (CPE)

Peter Verschut
Wanscherdwarweg 22a, ALMELO
p.verschut@cpegroup.nl

Plasticon Composites International Contracting B.V.

Cor Rensen
Parallelstraat 50, OLDENZAAL
c.rensen@plasticoneurope.com

Polymer Science Park

Gydo Willemsen
Ceintuurbaan 15, ZWOLLE
G.Willemsen@polymersciencepark.nl

Quadrant EPP Nederland B.V.

Michiel de Schipper
Rob Oolderink
Anth. Fokkerweg 2, ALMELO
Michiel.de-Schipper@QPLAS.com
Rob.Oolderink@QPLAS.com

Roessingh Revalidatie Techniek B.V.

JohnJohn de Koning
Roessinghsbleekweg 167, ENSCHEDE
j.dekoning@rrt.nl

ThermoPlastic Composites Research Centre

Harald Heerink
Palatijn 15, ENSCHEDE
harald.heerink@tprc.nl

Timmerije B.V.

André van Oostenbrugge
Schoolweg 29, NEEDE
a.voostenbrugge@timmerije.nl

Universiteit Twente

Remko Akkerman
Drienerlolaan 5, ENSCHEDE
laurent.warnet@tprc.nl

Bijlage 2: Verslagen en rapporten

1. Thomas de Bruijn, Programma van Eisen 3DComp, Oktober 2014
2. Remi Hoefman, Het aanvullen en verbeteren van de bestaande composietpers, Stageopdracht Saxion, 22 juni 2015
3. Martijn van den Bos, Filament Winding - Stageopdracht bij het lectoraat LC, Stageopdracht Saxion, 4 juli 2014
4. Remi Hoefman, 'De volgende generatie kunststof producten', Afstudeeropdracht Timmerije / Saxion, 30 maart 2016
5. Wouter Slot, 'Filament winding voor transtibiale kokers & enkel voet protheses', Afstudeeropdracht 'Roessingh Revalidatie Techniek, 24 maart 2016
6. Nick van der Geest, 'Continuous fiber reinforced inserts in nylon GSM cable sheaves', Afstudeeropdracht Quadrant, 11 januari 2016
7. Patrick Painczyk, 'Versterking van steigerplanken uit gerecycled kunststofafval d.m.v. glasvezels' Afstudeeropdracht Gampet, 5 juli 2016
8. Wouter van Driel, "Flevobike, Als fietsen je ligt", Stageopdracht Flevobike, 30 juni 2016
9. Projectgroep, 'Simplifying prosthesis production process', Living Technology project Roessingh Revalidatie Techniek, 18 januari 2016
10. Projectgroep, '3DComp Medical', Living Technology project Roessingh Revalidatie Techniek, 29 juni 2016
11. Niels Schroten, 'Vezelversterking in rotatiegietproducten', Afstudeeropdracht Pentas, 1 november 2016
12. Projectgroep, 'Hielspoor', Living Technology project Aert Bakker, 18 januari 2016
13. Jelmer Stegenga, 'Herontwerp hand applicator', januari 2016

Overige:

- Project website:
<https://www.saxion.nl/designentechnologie/site/onderzoek/onderzoeksprojecten/3dcomp/>
- Video Technologie: https://video.saxion.nl/media/3D+Printing+V3/1_bawcbh8s
- Roessingh Revalidatie awardwinner, <https://vimeo.com/146405246>
- Samenwerking Roessingh Revalidatie Techniek: <http://www.rrt.nl/nieuws/182-samenwerking-saxion-en-rrt-op-het-gebied-van-3d-printing-prothesekokers>
- Publicaties:
Cost-Effective Use of Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites in Plastic Products, 2015, CAMX, Dallas, Texas, USA
- Presentaties:
 - o 12-1-2016, Trends in 3D Printing & Composites, Presentatie LED congres Saxion
 - o 23-sep-15, 3D printen van Composieten, Kunststoffen beurs Veldhoven
 - o 27-okt-15 Cost-Effective Use of Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites in Plastic Products, 2015, CAMX, Dallas, Texas, USA
 - o 22-11-2015, Roessingh Revalidatie awardwinner, <https://vimeo.com/146405246>
 - o 3-2-2016, Samenwerking Saxion en RRT op het gebied van 3D Printing prothesekokers, Nieuwsbrief Roessingh
 - o 7-9-2016 Saxion en Roessingh Revalidatie Techniek ontwikkelen lichtgewicht prothese uit 3D-printer, <http://www.kennispark.nl/nl/nieuws/11834-saxion-en-roessingh-revalidatie-techniek-ontwikkelen-lichtgewicht-prothese-uit-3d-printer/>
 - o 6-9-2016, Saxion en Roessingh Revalidatie Techniek ontwikkelen lichtgewicht prothese uit 3D-printer, <http://www.ad.nl/enschede/saxion-en-roessingh-ontwikkelen-prothese-uit-3d-printer~a1e6e7ac/>
 - o 6-9-2016, Saxion en Roessingh Revalidatie Techniek ontwikkelen lichtgewicht prothese uit 3D-printer, <http://www.tubantia.nl/regio/enschede-en-omgeving/enschede/saxion-en-roessingh-ontwikkelen-prothese-uit-3d-printer-1.6346291>
 - o 6-9-2016, Saxion en Roessingh Revalidatie Techniek ontwikkelen lichtgewicht prothese uit 3D-printer, http://www.sax.nu/nieuws/682209/Saxion_ontwikkelt_lichtgewicht_prothese_met_3D-printer
 - o 6-9-2016, Interview tijdens uitzending op radio, <http://www.tvenschedefm.nl/saxion-en-roessingh-ontwikkelen-prothese-uit-3d-printer/nieuws/item?825537>
 - o 8-9-2016, Saxion en Roessing komen met 3D-prothese, <http://3dprinter-kopen.nl/saxion-en-roessingh-komen-met-3d-prothese/>
 - o 6-9-2016, Prothese uit thermoplastische composieten een stap dichterbij, https://www.saxion.nl/designentechnologie/site/_news/3dcomp-prothese/
 - o 6-9-2016, Saxion en RRT ontwikkelen lichtgewicht prothesekoker uit 3D printer, <http://www.rrt.nl/nieuws/194-saxion-en-rrt-ontwikkelen-lichtgewicht-prothesekoker-uit-3d-printer>

Bijlage 3: Referenties

1. Anon., "Overview of the worldwide composites industry 2010-2015 – 2011 release", JEC Composites (2011)
2. B. Jahn, E. Witten, "Composites market report 2013", AVK (2013)
3. Anon., "Plastics, the facts 2012", PlasticEurope (2012)
4. W. Schijve, "Properties of long glass fiber polypropylene composites with varying length distributions", in Proc. 10th European Conference on Composit Materials, ECCM10, Brugge, Belgium (2002)
5. J.L. Thomason, "The influence of fibre length, diameter and concentration on the modulus of glass fibre reinforced polyamide 6,6", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39(11), 1731 (2008)
6. Oliver Geiger, Frank Henning, P. Eyerer, R. Brüssel, Heinrich Ernst, "LFT-D: materials tailored for new applications", Reinforced Plastics, 50(1), p30 (2006)
7. Anon., "Improved materials promise new opportunities for GMT", Reinforced Plastics 43(7-8), p.48 (1999)
8. Arnt R. Offringa, "Thermoplastic composites—rapid processing applications", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 27(4), p329 (1996)
9. R.H.W. ten Thije, R. Akkerman, M. Ubbink, L. van der Meer, "A lubrication approach to friction in thermoplastic composites forming processes", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42(8), p950 (2011)
10. Martine Dubé, Pascal Hubert, Jan N.A.H. Gallet, Darko Stavrov, Harald E.N. Bersee, Ali Yousefpou, "Fatigue performance characterisation of resistance-welded thermoplastic composites", Composites Science and Technology, 68(7-8) p1759 (2008)
11. Anon., "Thermoplastic composites gain leading edge on the A380", High-Performance Composites, Maart (2006)
12. Anon., "Gulfstream Doesn't Give Wings, but how About a Tail?", Composite Manufacturing Online, Januari (2011)
13. Michel Biron, "Future Prospects for Thermosets and Composites", in: "Thermosets and Composites (2nd Edition), Material Selection, Applications, Manufacturing and Cost Analysis", Michel Biron (ed.), William Andrew, Norwich, NY, USA11 (2014).
14. D.H-J.a. Lukaszewicz, C. Ward and K.D.Potter, "The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future", Composites Part B: Engineering, 43(3) p997 (2012)
15. M.A. Khan, P.Mitschang, and R. Schledjewski, "Parametric study on processing parameters and resulting part quality through thermoplastic placement process", Journal of Composit Materials 47(4) p485 (2012)
16. S. Black, "New equipment brings tape placement within reach of smaller shops", Compositesworld, September (2013)

17. Anon., "BMW formally launches i3 manufacture and assembly", Composites World, September (2013)
18. F. Henning, W. Krause, "Long-fiber Thermoplastics tailored for structural performance", ACCE 5th Automotive and Composites Conference, Troy, USA (2005)
19. A.R. Harrison, "Automotive Composite Components", in "Integrated Design and Manufacture Using Fibre-Reinforced Polymeric Composites", M.J. Owen, et.al. (eds.), CRC Press, USA (2000)
20. Anon., "Composite brake pedal produced in one-shot process", beschikbaar op: <http://www.engel-k-online.com/en/news/composite-brake-pedal-produced-one-shot-process> (laatst bezocht 5 maart 2014)
21. Anon., "Premium-quality parts – dimensionally stable, functional and lightweight", beschikbaar op: http://www.kraussmaffei.com/en/press-releases/d/K2013_IMM_Lightweight.html (laatst bezocht 5 maart 2014)
22. H.E.N. Bersee, "Diaphragm forming of continuous fibre reinforced thermoplastics. Process analysis and development", PhD-thesis TUDelft (1996)
23. L.M.J. Robroek, "The development of rubber forming as a rapid thermoforming technique for continuous fibre reinforced thermoplastic composites: quality control by process control", PhD-thesis TUDelft (1994)
24. T.J. Ahmed, D. Stavrov, H.E.N. Bersee, A. Beukers, "Induction welding of thermoplastic composites—an overview", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(10), 1638 (2006).
25. D. Stavrov, H.E.N. Bersee, "Resistance welding of thermoplastic composites—an overview", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36(1), 39 (2005).
26. E.A.D. Lamers, R. Akkerman, S. Wijskamp, "Fibre Orientation Modelling for Rubber Press Forming of Thermoplastic Laminates", International Journal of Forming Processes, 6(3-4), 443 (2003).
27. W.J.B. Groupe, L. Warnet, A.D. Rietman, R. Akkerman, "On the weld strength of in situ tape placed reinforcements on weave reinforced structures", Composites Part A, Applied science and manufacturing, 43(9), 1530 (2012).
28. R.H.W. ten Hijje, R. Akkerman, M. Ubbink, L. van der Meer, "A lubrication approach to friction in thermoplastic composites forming processes", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42(8), 950 (2011).
29. Twintex, beschikbaar op: <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/composite-material/gmtex-R.html> (laatst bezocht 5 maart 2014)
30. TenCate Cetex, NL, beschikbaar op: <http://www.tencate.com/amer/industrial-composites/brands/tencate-cetex/default.aspx> (laatst bezocht 5 maart 2014)
31. Bond Laminates, DE, beschikbaar op: <http://www.bond-laminates.com/en/> (laatst bezocht 5 maart 2014)
32. Ticona-Celanese, DE beschikbaar op: <http://www.celanese.com/engineered-materials/products/Celstran-CFRT.aspx> (laatst bezocht 5 maart 2014)
33. Comfil, DK, beschikbaar op: <http://www.comfil.biz/products/tapes.php> (laatst bezocht 5 maart 2014)

34. Jushi, CN, beschikbaar op: <http://jushiusa.com/data-page-by-tag/18> (laatst bezocht 5 maart 2014)
35. Jonam, UK, beschikbaar op: <http://www.jonam.co.uk/> (laatst bezocht 5 maart 2014)
36. CompTape, NL, beschikbaar op: <http://compositetape.com/> (laatst bezocht 5 maart 2014)
37. FRT Tapes, NL, beschikbaar op: <http://www.frttapes.com/> (laatst bezocht 5 maart 2014)
38. Recycling of Polymer Materials, beschikbaar op: http://www.techforfuture.nl/57-Recycling_of_Polymer_Materials.html (laatst bezocht 4 maart 2014)
39. Recycling in Ontwerp, beschikbaar op <http://saxion.nl/rio> (laatst bezocht 4 maart 2014)
40. "Eindrapportage LCA Composietbrug", BECO groep Rotterdam, internal report (2009).
41. Anon., "LCA van een glasvezelversterkte brug", beschikbaar op <http://www.routekaartchemie.nl/icoonglasvezelbrug>, (laatst bezocht 5 maart 2014)
42. T. Wohlers, "Wohlers report: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry", Wohlers Associates, Fort Collins CO, USA (2012)
43. I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, "Additive Manufacturing Technologies", Springer Verlag, New York, USA (2009)
44. Breakthrough in 3D Printing, beschikbaar op: http://www.techforfuture.nl/38-Doorbraak_in_3Dprinten.html (laatst bezocht 4 maart 2014)
45. FabLab Enschede, beschikbaar op: <http://www.fablabenschede.nl/> (laatst bezocht 4 maart 2014)
46. MarkForg3D, USA, beschikbaar op: <http://markforged.com/> (laatst bezocht 5 maart 2014)
47. America Makes: National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII), beschikbaar op http://manufacturing.gov/nami_pilot_institute.html (laatst bezocht 5 maart 2014)
48. Anon., "Stratasys and Oak Ridge National Laboratory Partner to Advance Additive Manufacturing", beschikbaar op <http://investors.stratasys.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=687923> (laatst bezocht 5 maart 2014)
49. S. Ibbotson, en S. Kara, "LCA case study. Part 1: cradle-to-grave environmental footprint analysis of composites and stainless steel I-beams", International Journal of Life Cycle Assessment, 18, p208 (2013)
50. C.L. Simões, L.M. Costa Pinto, en C. A. Bernardo, "Modelling the economic and environmental performance of engineering products: a materials selection case study", International Journal of Life Cycle Assessment, 17, p678 (2013)
51. Icons page 9 made by Freepik from www.flaticon.com
52. Bron achtergrondafbeelding pagina 24: <http://www.platinumblasting.com/safety/environment/>

