

Lectoraat Kunststoftechnologie

Hybride Hergebruik Kunststoffen

RAAK-MKB-project in combinatie
met RegioDeal Overijssel





Het team: (v.l.n.r.)

Margie Topp, Eric Roetman, Albert ten Busschen, Mijke Leushuis, Koen Hermans, Hans van Hoek, Lena Lappa, Pieter Schreuder Peter Bosman

Colofon

Titel:	Hybride Hergebruik Kunststoffen: RAAK-MKB-project in combinatie met RegioDeal Overijssel
Publicatie nummer:	LKT-CE-108157-2301
Publicatie datum:	Juni 2023
Auteurs:	A. Ten Busschen PhD, M.D.C. Topp PhD, P. Schreuder BSc, K. Hermans BSc
Subsidieverstrekker:	Regieorgaan SIA, RAAK-MKB en RegioDeal Overijssel
Fotografie:	hogeschool Windesheim
Onderzoekslijnen:	



1 Circulaire economie



2 Industrial Additive Manufacturing (3D printen)



3 Hybride ontwerp



4 Duurzaam produceren

Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

Deze publicatie wordt uitgebracht door het Lectoraat Kunststoftechnologie, een praktijkgerichte onderzoeksgroep op Hogeschool Windesheim die zijn basis heeft in Engineering & Design. Zoals passend bij lectoraten in combinatie met de gebruikte subsidieregeling, is het onderzoek uitgewerkt tot een TRL niveau van maximaal 7: demonstratie systeemprototype in operationele omgeving. Het werk is zo opgeschreven dat het na-werkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.



Logo's van partners



Voorwoord

Dit rapport beschrijft de activiteiten en resultaten van het RAAK-MKB-project 'Hybride hergebruik kunststoffen'. Het project is uitgevoerd van oktober 2019 tot februari 2022 onder leiding van het Lectoraat Kunststoftechnologie van Windesheim. Het project volgde op een reeks KIEM-VANG-projecten in de periode 2015-2017 en het RAAK-MKB-project 'Industrieel hergebruik van EoL composieten' in de periode 2017-2019. Het vormde een logisch vervolg op deze onderzoeksprojecten waarbij de behoefte naar voren kwam van de MKB-bedrijven om de verschillende moeilijk te recyclen kunststoffen (composieten, autobanden en mix-plastics) middels een hergebruikmethode toch circulair te krijgen. Gedurende het project is er vanuit de Overijsselse Regiodeal extra financiering gekomen om aanvullende onderzoeken te doen. Wij zijn de deelnemers aan het project dankbaarheid verschuldigd voor hun inbreng en hun geloof in de ontwikkeling. Regie-orgaan SiA en de provincie Overijssel willen we in het bijzonder bedanken voor de beschikbaar gestelde financiering voor dit project.

Dr. Ir. Albert ten Busschen, Projectleider

Zwolle, 12 juni 2023

Samenvatting

Het onderhavige RAAK-MKB-project volgt op een serie onderzoeksprojecten van het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) naar een methode voor het hergebruiken van end-of-life (EoL) thermoharde composieten. Deze serie onderzoeken is gestart in de periode 2015-2017 met een reeks haalbaarheidsstudies in de vorm van KIEM-VANG-projecten. Daarna volgde in de periode 2017-2019 een RAAK-MKB-project waar de methode van hergebruik van EoL composieten verder werd ontwikkeld tot een industriële technologie.

In dit project 'Hybride hergebruik kunststoffen' is onderzocht of de methode van hergebruik van EoL thermoharde composieten kan worden gecombineerd met verwerken van andere moeilijk te recyclen kunststoffen, zoals autobanden en 'mix-plastics'. Hiervoor waren twee aanleidingen. De eerste aanleiding kwam uit het voorafgaande RAAK-MKB-project dat zich richtte op industrieel hergebruik van EoL thermoharde composieten. Hierbij bleek dat bij de meeste verwerkingstechnieken teveel extra virgin grondstoffen (vooral hars) nodig waren waardoor de business-case economisch en milieutechnisch ongunstig wordt. Alleen het push-pultrusie-proces bleek tot producten te leiden met een voldoende hoge EoL vulling (voldoende laag gehalte virgin grondstof) maar maakt een beperkt type producten mogelijk: prismatische profielen. Voor het gebruik van andere technieken, zoals lamineren en injectietechnieken waarmee andere typen producten gemaakt kunnen worden is dus verdere reductie van het gebruik van virgin grondstoffen nodig. De andere aanleiding kwam voort uit de brede roep uit de maatschappij en de industrie om meer oplossingen te vinden voor nuttig hergebruik van moeilijk te recyclen kunststoffen. Voor deze afvalstromen is vooralsnog geen grootschalige, economisch verantwoorde recycling of hergebruikmethode voorhanden en deze stromen worden vooralsnog grotendeels gestort of verbrand.

Door in het ontwerp van producten het hergebruik van de verschillende moeilijk te recyclen kunststoffen in te zetten, kunnen ook andere producten gemaakt worden dan alleen profielen, waarbij het gebruik van virgin grondstoffen voldoende laag gehouden wordt. Met deze hybride aanpak kunnen tevens meer moeilijk te recyclen kunststoffen hergebruikt worden. Belangrijke voorwaarde voor het hybride product is dat deze zodanig ontworpen is dat bij het bereiken van het EoL-stadium het zelf ook weer goed te hergebruiken is. Dit wordt aangeduid met 'Design for Circularity'. In de praktijk betekent dit dat de onderdelen van het product gemaakt van de verschillende hergebruikte kunststof-afvalstromen weer per type afvalstroom gescheiden kunnen worden en op die manier weer opnieuw kunnen dienen voor een nieuw geproduceerd product van hergebruikte kunststoffen.

In het project zijn de drie afvalstromen van de genoemde moeilijk te recyclen kunststoffen verder onderzocht. Voor de EoL thermoharde composieten was al uit het vorige RAAK-project hiervan een vrij compleet beeld verkregen. Dit beeld is niet veel veranderd tijdens het huidige project en het blijkt dat de stroom EoL thermoharde composieten in Nederland momenteel goed zijn voor zo'n 6.000 ton per jaar, voornamelijk polyester bootrompen en rotorbladen voor windmolens (extrapolatie KIEM-VANG-project 2016). Voor de afvalstroom oude autobanden is een inventarisatie gemaakt van de hoeveelheden in samenwerking met projectpartner RecyBEM. Zo blijken er in Nederland alleen jaarlijks 9 miljoen oude autobanden vrij te komen. Daarnaast is de variatie in de soorten autobanden in kaart gebracht middels een onderzoek aan een steekproef van 100 aselekt verzamelde oude autobanden. Voor de afvalstroom van 'mix-plastics' is ook een inventarisatie gemaakt. Het blijkt dat er verschillende ontwikkelingen (scenario's) mogelijk zijn voor de samenstelling van deze afvalstroom. Het blijkt dat door het verbeteren van het sorteren van kunststofafval in wel te recyclen kunststofafvalstromen de samenstelling van de 'mix-plastics', het kunststofafval dat daarbij overblijft (DKR-350), heterogener wordt en daardoor nog minder geschikt voor hergebruik. Momenteel bedraagt de afvalstroom 'mix-plastics' in Nederland ca. 200.000 ton per jaar, zo is gebleken uit literatuuronderzoek.



In het project is onderzocht welke product-onderdelen gemaakt kunnen worden om te kunnen komen tot een hybride productontwerp. Uit het vorige RAAK-project waren hiervoor al veel methoden voorhanden voor het verwerken van EoL thermoharde composieten. In deze methode worden de EoL producten verwerkt tot vlokken die kunnen worden ingebed in een virgin hars. Projectpartner Circular Recycling Company (CRC) heeft deze verwerking verbeterd tot een proces waarbij kwalitatief goede fracties vlokken ontstaan waarbij de herkomst geormerkt is. Voor de oude autobanden is, gezien het elastische karakter van rubber, gedacht aan onderdelen die ingezet kunnen worden voor verende en energie-absorberende onderdelen. Uit de onderzoeken volgde dat bepaalde configuraties, zoals opgevouwen loopvlak-stroken, zich hier goed voor lenen. Voor de 'mix-plastics' zijn onderzoeken uitgevoerd om te onderzoeken of hiermee een schuim te vervaardigen was zonder het materiaal verder op te werken. Het materiaal bleek echter te heterogeen om een goed samenhangend geheel te vormen door middel van verhitten.

Toevoegen van een zuiverder thermoplast-afvalstroom, zoals bedrijfsafval van partner Sekisui Alveo gaf wel een verbetering. In samenwerking met ORA en Attero is geprobeerd op te schalen naar een industrieel proces met een daarvoor ontwikkelde lage-druk opsmelt-extruder. Maar bij het proces ontstond stevast een product met een veel te hoge dichtheid van minstens 600 kg/m³ of hoger. Dit schuim bleek te weinig elastisch (verend), kon nauwelijks gebruikt worden voor gewichtsreductie (bijvoorbeeld in een sandwichtoepassing) en bleek ook niet geschikt als warmte-isolator. Mogelijk zou dit materiaal wel geschikt zijn als stootvast bekledingsmateriaal.

Om de onderdelen van hergebruikte kunststoffen verder te gebruiken in een hybride ontwerp is gekozen voor het realiseren van full-scale demonstrators. Het gebruik van full-scale demonstrators maakt het mogelijk om onderzoek te doen tot een TRL-niveau 7, waarbij de technische haalbaarheid en de vervaardigings- en installatiekosten kunnen worden onderzocht. Tevens bieden de demonstrators de mogelijkheid om de kosten en milieu-impact tijdens de levenscyclus te analyseren (LCC en LCA). Twee demonstrators waarbij het beoogde principe van hybride hergebruik succesvol is gelukt zijn de geleidewerkbalken en de inlays van hergebruikt composiet in profielen van 'mix-plastics'.

Er zijn twee typen geleidewerkbalken ontwikkeld die toegepast kunnen worden als verende geleidebalk voor pleziervaartboten bij bruggen en sluizen. Het principe van de werking is een balk met een verend element achter een profiel waar de boot tegen aan schampt. In deze rapportage is de geleidewerkbalk beschreven die is ontworpen als twee balkhelften van composiet (deels bestaande uit hergebruikt EoL composiet) waartussen opgevouwen loopvlakstrips van oude autobanden zijn geplaatst. Het tweede type geleidewerkbalk bestaat uit een schampprofiel gemaakt van 'mix-plastics' met aan de kade-zijde een sponning waarin een verende rubber kern (virgin EPDM) is geplaatst die uitsteekt uit het schampprofiel. Deze uitvoering is in een andere lectoraatsrapportage beschreven. Beide geleidewerkbalken zijn full-scale gemaakt en getest en voldeden aan de praktijksituatie. Bovendien is de opbouw zodanig dat deze aan het eind van het leven (EoL) of gebruik (EoU) in de afzonderlijke onderdelen kan worden gescheiden.

Voor de inlays van hergebruikt composiet in profielen van 'mix-plastics' is samengewerkt met Save Plastics. De profielen die Save Plastics levert zijn gemaakt van 'mix-plastics' en hebben een relatief lage stijfheid en vertonen veel kruip bij permanente belasting. Dit beperkt de markttoepassing. Daarom is een hybride ontwerp ontwikkeld die deze eigenschappen verbetert door het opnemen van een inlage ('inlay') van hergebruikt composiet in een sponning in het standaard dekprofiel van Save Plastics. De verbetering van zowel de stijfheid als van de kruipvastheid werd middels full-scale tests aangetoond en was boven verwachting goed. Ook is in een verdere doorontwikkeling de produceerbaarheid voor Save Plastics verder uitgewerkt.

Dan was er nog een categorie demonstrators die wel succesvol zijn geweest voor hun toepassing maar niet op een zinvolle wijze (technisch en/of economisch wat betreft milieu-impact) op een hybride manier konden worden ontworpen. Niettemin zijn ze als productontwikkeling toch zeker interessant gebleken.

Van deze demonstrators is de dwarsligger van hergebruikt composiet een ontwikkeling met grote potentie. In samenwerking met de NS is een full-scale prototype gemaakt van een NS90 dwarsligger. Deze is geheel opgebouwd uit thermoset composiet: een groot aandeel bestaat uit EoL thermoset composietvlokken die zijn verkregen uit de interieurpanelen die bij treinrevisies van de NS zijn vrijgekomen. Een buitenschil van virgin composiet fungeerde hierbij als verloren mal. Hierbij is samengewerkt met CRC voor het verkrijgen van de vlokken en met Alom voor een gietmal en bevestigingsmaterialen voor spoorstaven. In een verdere ontwikkeling is met 3DMZ gewerkt aan met printen van productiemallen voor het maken van dwarsliggers.

Hierbij is onderzocht of het mogelijk was om als print-materiaal gebruik te maken van gerecyclede kunststoffen en bio-based kunststoffen. Dit is onderzocht met aanvullende financiering vanuit provincie Overijssel (de 'Regiodeal'). Het is gelukt om met bio-based, thermoplast PLA een mal te printen die door het opnemen van een intern koelkanaalsysteem geschikt bleek om de hoge exotherme uithardingspiek (120 °C) tijdens het produceren van een thermoset dwarsligger te weerstaan. Bovendien is een vacuüm-gevormde, lossende binnenschil ontwikkeld die het mogelijk maakte om zonder nabewerking van het geprinte oppervlak, de mal te gebruiken.

Andere demonstrators die zijn ontwikkeld in het project zijn een muuranker van hergebruikt composiet (ontwikkeld in samenwerking met Compofloor) en plafondplaten van hergebruikt filterafval (ontwikkeld in samenwerking met Strukton). Deze zijn ook in de rapportage beschreven.

Net als in het vorige RAAK-project is de analyse van de totale levensduur in het project als belangrijk onderdeel van de business-case naar voren gekomen. Omdat de methoden voor het opstellen van een kostenanalyse (LCC) en een milieu-impactanalyse (LCA) zeer omvangrijk en specialistisch zijn, zijn deze in een separate lectoraatsrapportage beschreven.

Het project startte met 40 consortium-partners en groeide tijdens zijn looptijd met 6 nieuwe partners die aanhaakten. De interesse in het onderwerp circulariteit is groot. Dat bleek niet alleen uit de grote deelname aan het project maar ook uit de talloze verzoeken voor interviews en presentaties die in die rapport beschreven staan. Bovendien is het project eind 2021 beloond met de hoofdprijs van de RAAK-Awards. Daarnaast hebben de ontwikkelingen op het gebied van hergebruik van EoL composiet, waarvan dit project ook deel uitmaakte geleid tot het in 2021 verkrijgen van de Delta-premie en in 2022 tot het verkrijgen van de JEC Innovation Award in de categorie Bouw en Infra. De ontwikkelde technologie wordt daarmee niet alleen in Nederland academisch en industrieel gewaardeerd maar ook internationaal herkend en erkend.

Er is binnen het project veel gedaan om de kennis te delen. Om de deelnemers goed te informeren over de resultaten van het project is elk kwartaal een nieuwsupdate verspreid. Daarnaast zijn diverse werkpakket-besprekingen gehouden. Er zijn bij de start van het project en na een jaar plenaire projectbijeenkomsten georganiseerd die goed waren bezocht. Echter door corona waren de mogelijkheden beperkt geworden en is de afsluitende bijeenkomst georganiseerd als een webinar. Naast de eerder genoemde interviews en presentaties over het project is er ook gepubliceerd. In het vakblad Reinforced Plastics is in 2020 een artikel over het onderwerp verschenen en in 2022 is het boek Waste Material Recycling in the Circular Economy – Challenges and Developments (Editor D.S. Achilias, Intech Open) met daarin een hoofdstuk over hergebruik van EoL composieten. Verder is er ook in diverse vakbladen en media over de methode van hergebruik van composieten geschreven.

Het project heeft een grote doorwerking gehad in het onderwijs. Naast de betrokkenheid van diverse docent/onderzoekers bij het project zijn er vele projecten uitgevoerd door studenten in de vorm van stage, afstuderen of minor-opdrachten. Bovendien zijn belangrijke resultaten uit het project opgenomen in het curriculum van een aantal studierichtingen.



Lijst met afkortingen

BGT	Bruikbaarheids Grenstoestand
CO ₂	Koolstofdioxide, gas dat (mede-) verantwoordelijk is voor klimaatverandering
CSM	Chopped Strand Mat, gehakte vezelmat (lamineermat)
CFM	Continuous Filament Mat, continumat (injectiemat)
CUR96	Civieltechnische Uitvoeringsrichtlijn voor construeren met VVK
DCPD	Dicyclopentadien, basisonomeer voor DCPD-type polyesterhars
DKR-350	Restmix van heterogene kunststofafvalstroom na recycling: 'mix-plastics'
EN	Europese Norm
EP	Epoxy
EoL	End-of-Life, na het 'leven' van een product
EoU	End-of-Use, na de gebruiksduur
EPDM	Ethyleen-Propyleen-Dieën-Monomeer, een elastomeer (rubber)
EuCIA	Europese branchevereniging composieten
GVK	Glasvezelversterkte Kunststof
HPL	High Pressure Laminate, houtgebaseerd plaatmateriaal van hoge persing
rHPL	High Pressure Laminate, gebaseerd op hergebruikt (re-used) composiet
ILSS	Interlaminar Shearstrength, interlaminaire afschuifsterkte
ISO	International Standard Organisation, internationale norm
JEC	Journées Européennes de Composites, wereldwijde composietbeurzen
KIEM-VANG	Projectvorm van SiA binnen het kader Van Afval Naar Grondstof i.s.m. MKB
LCC	Life Cycle Cost calculation, kostenanalyse
LCA	Life Cycle Assessment, levenscyclusanalyse
LKT	Lectoraat Kunststoftechnologie, Windesheim
MEKP	Methyl Ethyl Keton Peroxide, harder voor koudhardende polyesterhars
MKB	Midden- en Kleinbedrijf
NEN	Nederlandse Norm
NRK	Nederlandse federatie Rubber en Kunststof
NWO	Nederlandse organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
PET	Polyethyleentereftalaat, thermoplastische polyester
PVC	Polyvinylchloride, thermoplast
PU, PUR	Polyurethaan
RAAK	Projectvorm van Regie-orgaan SiA voor toegepast onderzoek in het hbo
RAAK-MKB	RAAK-project specifiek in samenwerking met het midden- en kleinbedrijf
RMC	Raw Material Cost, grondstofkosten
SiA	Nationaal Regie-orgaan voor Praktijkgericht onderzoek (onderdeel van NWO)
SMC	Sheet Moulding Compound, polyestergebaseerde prepreg voor warm persen
TRL	Technology Readiness Level, technische gereedheid (niveau's 1 tot en met 9)
UD	Unidirectioneel, vezelversterking in een richting
UGT	Uiterste grenstoestand
UP, UPR	Unsaturated Polyester, onverzadigde polyester (hars)
VANG	Van Afval Naar Grondstof
VE	Vinylester (hars)
VVK	Vezelversterkte Kunststof (composiet)

Inhoudsopgave

Logo's van partners	3
Voorwoord	4
Samenvatting	5
Lijst met afkortingen	8
Inhoudsopgave	9
1 Inleiding	10
1.1 Hergebruik van thermoharde composieten	10
1.2 Principe van hybride hergebruik kunststoffen	14
1.3 Parallele onderzoeken Life Cycle Cost (LCC) en Life Cycle Assessment (LCA)	16
1.4 Doel en opzet van het project	16
2 Verwerking van EoL kunststoffen tot grondstof	19
2.1 Thermoharde composieten	19
2.2 Mix-plastics	23
2.3 Autobanden	25
3 Demonstrators	28
3.1 Inlay van hergebruikt composiet	28
3.2 Geleide-werkbalk	33
3.3 Dwarsligger van hergebruikt composiet (korte beschrijving)	38
3.4 Printen van mallen voor dwarsliggers van hergebruikt composiet (korte beschrijving)	39
3.5 Muuranker voor composietvloer (korte beschrijving)	40
3.6 Plafondplaten van filterafval (korte beschrijving)	41
4 Disseminatie en onderwijs	42
4.1 Informatievoorziening projectgroep	42
4.2 Media-aandacht	42
4.3 Netwerkontwikkeling	44
4.4 Onderwijsbetrokkenheid	44
5 Conclusies en aanbevelingen	47
6 Literatuur	49
Appendix 1 Projectdeelnemers	51
Appendix 2 Bijeenkomsten, interviews, presentaties, paneldiscussies, media	53
Appendix 3 Onderzoeks-memoranda	57
Appendix 4 Productiegegevens en foto's	70



1 Inleiding

1.1 Hergebruik van thermoharde composieten

Thermoharde composieten zijn vezel-versterkte kunststoffen waarbij een thermoharde kunststof is gebruikt. Met deze materialen kunnen producten worden gemaakt met een bijzondere combinatie van vormgevingsvrijheid, laag gewicht en hoge sterkte. Ook zijn deze materialen goed bestand tegen inwerking van vocht en hebben een lange levensduur. Door deze unieke combinatie van eigenschappen hebben (thermoharde) composieten hun exclusieve plaats gekregen voor toepassingen zoals in de lucht- en ruimtevaart, jachtbouw, windindustrie, (chemische) industrie, transport, bouw, sport en recreatie.



Figuur 1.1 Jacht met romp van composiet (bron: NJI)

Naast de voordelen die het gebruik van de thermoharder oplevert voor het product levert het echter ook een probleem op voor de *recycling* van het product aan het einde van de levensduur. Doordat de thermoharder niet kan smelten is de composiet niet zonder degradatie te scheiden in de oorspronkelijke componenten. Dit levert al sinds de negentiger jaren een probleem op voor het recyclen van composietproducten [1,2,3].

Er zijn veelbelovende ontwikkelingen die de recycling van thermoharde composietproducten misschien in de toekomst mogelijk maken. Zo heeft in 2021 Siemens Gamesa, producent van rotorbladen voor windmolens aangekondigd rotorbladen te gaan produceren met een epoxy-hars die opgelost kan worden in warm, aangezuurd water [4]. Andere ontwikkelingen om rotorbladen te ontwerpen met thermoplastische composieten zijn ook veelbelovend om recycling mogelijk te maken [5]. Echter, dit is tot op heden nog steeds niet op grote schaal ingevoerd. En ook al worden deze ontwikkelingen morgen op industriële schaal mogelijk, dan is er de komende 30 jaar nog een composietafvalstroom te verwerken die met traditionele thermoharde composieten zijn vervaardigd en dus niet te recyclen zijn.

Het maatschappelijk belang is groot om de groeiende stroom composietafval circulair te kunnen verwerken. Vooral door de toename van het aantal windmolenparken zal de komende 30 jaar de stroom End-of-Life (EoL) thermoharde composiet sterk stijgen [6]. De grote hoeveelheid composiet rotorbladen die nu al vrijkomt levert reeds een probleem op om deze op een maatschappelijk acceptabele, circulaire manier te verwerken. De verontwaardiging was groot toen honderden rotorbladen in een woestijn in Wyoming (VS) werden begraven (zie Figuur 1.2). Storten wordt steeds minder geaccepteerd en is in Nederland al uitgebannen. Maar ook verbranden wordt niet meer gezien als een duurzame oplossing, ondanks het eventueel nuttig gebruik van de verbrandingswarmte.



Figuur 1.2 Stort van rotorbladen in Wyoming, VS (bron: Daily mail, 6 mei 2020)

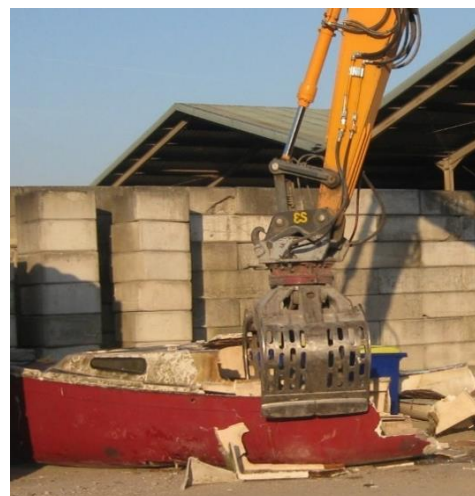
Met het oog op het grote belang van circulariteit van thermoharde composiet voor duurzame energieopwekking (windenergie) is het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) van Windesheim vanaf 2015 begonnen met de ontwikkeling van een andere manier om EoL thermoharde composieten circulair te verwerken. Deze methode wordt aangeduid met 'structureel hergebruik van composiet' of vaak korter: 'hergebruik van composiet'. Een overzicht van de diverse haalbaarheidsonderzoeken (KIEM-VANG) en de verdere ontwikkeling van de methode tot een industriële technologie is beschreven in de rapportage van het RAAK-MKB-project 'Industrieel hergebruik van EoL thermoharde composieten' [7].

De methode start met het in stappen verkleinen van het EoL composietproduct tot langwerpige vlokken, zie Figuur 1.3. Deze vlokken bestaan nog steeds uit het samengestelde composietmateriaal. Hierdoor blijven de mechanische sterkte en de vochtbestendigheid van het composiet behouden. De vlokken kunnen vervolgens als grondstof gebruikt worden in de vorm van versterkingselementjes in nieuwe composietproducten. Hierbij moet wel nieuwe (virgin) thermoharde hars worden toegevoegd om de vlokken tot een geheel te binden.



Figuur 1.3 Vlokken uit EoL thermoharde composiet

De verkleining van een EoL composietproduct tot vlokken gebeurt in een aantal stappen. Grote producten zoals rotorbladen of bootrompen worden eerst in grote stukken gezaagd of gebroken, zie Figuur 1.4. Vervolgens worden deze stukken verder verkleind tot afmetingen die geschikt zijn om in een shreddermachine te verwerken tot vlokken. Bij alle stappen van bewerking komt stof vrij dat moet worden afgevangen om verspreiding in het milieu te voorkomen.



Figuur 1.4 Eerste verkleiningsstap van rotorblad (bron: Regrata) en bootromp

Doordat de vlokken moeten worden ingebed in nieuwe hars is een minimale wanddikte van het nieuwe product nodig van enkele centimeters. Hierdoor is het niet mogelijk om met de vlokken nieuwe dunwandige producten te maken zoals de bootrompen of producten met zeer hoge sterkte zoals de rotorbladen waaruit ze verkregen zijn. De methode levert dikwandige producten op met een hoge mechanische sterkte en een goede bestendigheid tegen vocht, net zoals een composiet dat uit virgin grondstoffen is vervaardigd. Dit zijn bij uitstek producten die geschikt zijn voor infra-toepassingen.

In het vorige RAAK-project is dit aangetoond met vier demonstrators: damwandplanken voor oeverbeschoeiing, geleidebalken in remmingwerken, dekplanken in een brugdek en een dragline-schot. Figuur 1.5 toont de eerste twee genoemde demonstrators. De damwandplanken zijn in 2017 geïnstalleerd als oeverbeschoeiing bij de Beatrixsluis in Almere (i.s.m. Waterschap Zuiderzeeland en Reimert Bouw en Infra, subsidie: Compoworld). De geleide-balken zijn in 2019 geïnstalleerd in vier remmingwerken bij de Heemskesbrug in Delfzijl (i.s.m. Provincie Groningen, Groningen Seaports, subsidie: Regie-orgaan SiA).



Figuur 1.5 Damwandplanken en geleide-balken van hergebruikt composiet

De methode van hergebruik van EoL thermoharde composiet kan een positieve business case opleveren, zowel wat betreft economische kosten als wat betreft milieukosten (eco-impact). Voorwaarden hiervoor zijn een efficiënt verwerkingsproces en een voldoende hoog percentage EoL materiaal in het nieuwe product. Het zogenaamde 'push-pultrusie' proces dat door het LKT is ontwikkeld voldoet aan deze voorwaarden [8,9]. Dit is een continu proces dat lijkt op het traditionele pultrusie-proces en waarbij een gehalte EoL gehaald wordt in het nieuwe, profielvormige product van 70% op gewichtsbasis.

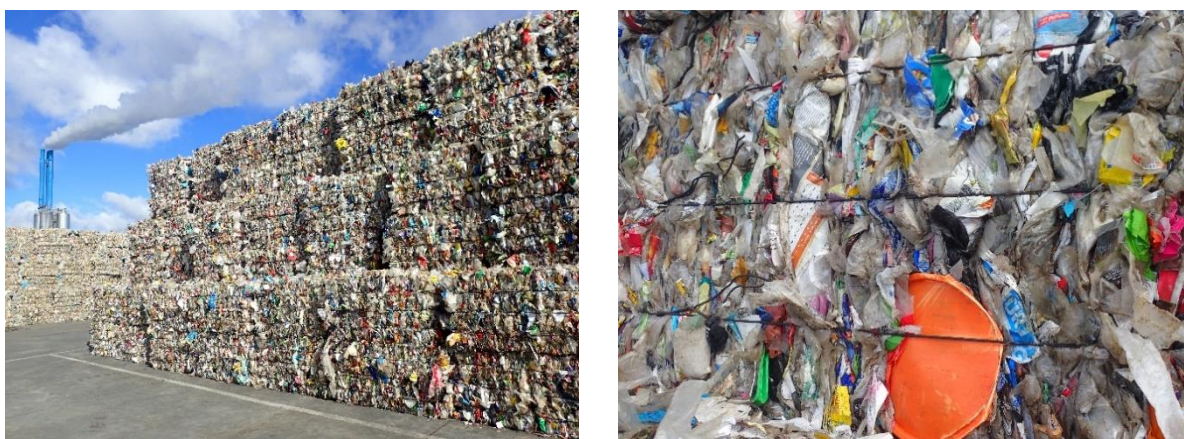
Belangrijk voordeel van de methode van hergebruik is dat er opnieuw een product gemaakt wordt van thermoharde composiet. Dit product kan aan het einde van de levensduur weer op dezelfde manier worden verkleind tot vlokken en worden hergebruikt. Hierdoor blijft steeds de stroom EoL composiet herkenbaar terug te vinden in nieuwe composietproducten en is er in principe een eindeloze circulariteit mogelijk.

1.2 Principe van hybride hergebruik kunststoffen

Thermoharde composieten zijn niet de enige kunststoffen die problematisch zijn voor recycling. Door een combinatie te maken met twee andere stromen afval-kunststoffen die moeilijk of niet te recyclen zijn ontstaat een hybride vorm van hergebruik. Dit zal later in deze inleiding nader worden toegelicht. Eerst worden de twee andere stromen afval-kunststoffen nader beschouwd.

Mix-plastics (DKR-350)

Bij de verwerking van kunststofafval uit huishoudens worden met sorteringsprocessen zo zuiver mogelijke kunststofstromen gewonnen die kunnen worden gerecycled. Dit betreft voornamelijk thermoplastische kunststoffen en het is een grote afvalstroom: in 2020 was dit voor thermoplastisch verpakkingsafval 630 kton in Nederland [10]. Hiervan werd 65% gerecycled en de rest verbrand. Echter, van de stroom voor recycling (410 kton) blijft na sortering maar liefst de helft van deze kunststofafvalstroom (ca. 200 kton) over als een niet verder te scheiden en verontreinigde stroom die wordt aangeduid met 'mix-plastics' of met de code DKR-350. Deze afvalstroom is zonder verdere toevoegingen niet te gebruiken voor het maken van nieuwe producten. DKR-350 is wisselend van samenstelling en bestaat voor minstens 90% uit een mengsel van afvalthermoplasten (PE, PP, PS en PET) en voor het resterende deel uit een sterk wisselende samenstelling van andere afvalfracties (organische bestanddelen zoals voedselresten, karton, glas, kleine metaaldeeltjes, etc.), zie ook het overzichtsrapport van TNO over dit type kunststof-afvalstromen [11]. Figuur 1.6 toont foto's van 'mixed plastics'.



Figuur 1.6 Mixed plastics, links: in balen, rechts: detail (DKR-350, bron: Attero)

Leveranciers van producten van gerecyclede kunststoffen gebruiken soms DKR 350 ('mix-plastics') voor het maken van producten, zoals palen en balken. Echter, hierbij wordt een substantiële hoeveelheid schoner kunststofafval aan de DKR 350 toegevoegd (zoals DKR 310) om het te kunnen verwerken. Echter, het meeste DKR 350 wordt verbrand in afvalverbrandingsovens.

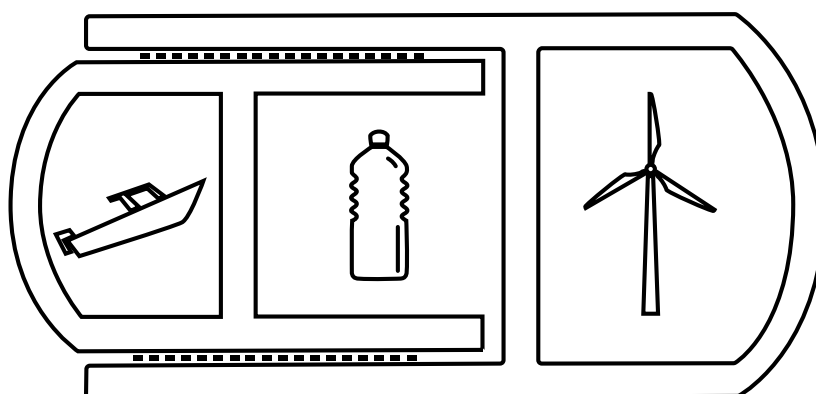
Oude autobanden

Een andere kunststofstroom die vooralsnog niet te recyclen is zijn oude autobanden. Ook dit is een grote afvalstroom. In Nederland komen jaarlijks ca. 9 miljoen oude autobanden van personenwagens vrij als afval [12]. Het is een moeilijke afvalstroom omdat een autoband een complex product is dat bestaat uit verschillende componenten (staal, aramide, versterkingsweefsel, etc.) waarbij het rubber dat het geheel samenbindt niet kan worden gesmolten of anderszins eenvoudig kan worden gescheiden van de componenten. Ook het rubber zelf heeft van plaats tot plaats een verschillende samenstelling in de band. Zo bestaat de band uit een combinatie van natuurrubber (NR), styreen-butadien-rubber (SBR), polybutadien-rubber (BR) en butyl-rubber (isobutyleen-isopreen, IIR) waarvan de verhoudingen van plaats tot plaats in de band verschillen.

Oude autobanden worden gedeeltelijk hergebruikt door ze te vermalen tot korrels of poeder. De korrels worden onder andere gebruikt op kunstgrasvelden. Het poeder wordt soms als vulstof in rubber-compounds gebruikt. Daarnaast wordt een deel van de afvalstroom opgeslagen of verbrand in verbrandingsovens.

Hybride hergebruik

Het principe van hybride hergebruik is erop gericht om de drie genoemde kunststofafvalstromen te hergebruiken tot een nieuw, bruikbaar product. Voorwaarde hierbij is dat het nieuwe product ontworpen is om zelf aan het eind van de gebruiksduur (levensduur) ook weer goed herbruikbaar is. Dit ontwerpen voor hergebruik (design for circularity) betekent in de praktijk dat de verschillende soorten kunststofafvalstromen niet vermengd worden maar als aparte, en goed losneembare componenten in het nieuwe product worden toegepast. In Figuur 1.8 wordt dit symbolisch geïllustreerd met een denkbeeldig product dat is opgebouwd uit verschillende afvalstromen die zich op verschillende, afgescheiden plaatsen in het product bevinden. Later in deze rapportage zullen concrete productvoorbeelden (demonstrators) worden uitgewerkt die met deze methodiek zijn ontwikkeld.



Figuur 1.8 Illustratie van hybride hergebruik in een denkbeeldig product

1.3 Parallele onderzoeken Life Cycle Cost (LCC) en Life Cycle Assessment (LCA)

Belangrijk voor de maatschappelijke relevantie van ontwikkelde producten is of deze interessant zijn voor de industrie om te gaan produceren en verkopen. Hiervoor moet het product een positieve business case hebben. Een positieve business case betekent dat het economisch interessant is (winst oplevert) maar ook dat het milieutechnisch interessant is. De milieu-impact van een product wordt meer en meer meegewogen en ook economisch meegerekend bij de marketing en verkoop van een product. De methoden om dit in kaart te brengen zijn een Life Cycle Cost (LCC) berekening en een Life Cycle Assessment (LCA) uitgevoerd. Gedurende het onderzoek is hier veel aandacht aan besteed en zijn de hiervoor beschikbare methodieken specifiek uitgewerkt voor producten gemaakt van hergebruikte kunststoffen.

Omdat de beschrijving van de methodieken voor LCC en LCA en de uitwerking voor een aantal producten dermate omvangrijk is, is besloten hiervan een separate lectoraatspublicatie te maken [13].

1.4 Doel en opzet van het project

Het project 'Hybride hergebruik kunststoffen' is uitgevoerd als een RAAK-MKB-project. Hiertoe is in maart 2019 een projectaanvraag opgesteld. Nationaal Regieorgaan Praktijkgericht Onderzoek SiA heeft deze aanvraag goedgekeurd onder dossiernummer RAAK.MKB10.017. Het project had aanvankelijk als looptijd oktober 2019 – oktober 2021 maar is door corona met vier maanden verlengd tot februari 2022.

Voorafgaand aan het project is op basis van praktijkvragen een centrale onderzoeksvraag geformuleerd die ook in de projectaanvraag is uitgewerkt:

Kunnen EoL kunststoffen in combinatie met hergebruikte thermoharde EoL composieten ingezet worden om middels lamineer- of injectietechnieken concurrerende circulaire producten te maken voor bouw en infra toepassingen?

Er wordt dus gebruik gemaakt van de reeds ontwikkelde methode van hergebruik van thermoharde EoL composieten waarbij combinaties worden gemaakt met andere EoL kunststoffen. Deze laatste zijn de 'mix-plastics' en de oude autobanden. Dit vormt het samengestelde, hybride product, waarbij circulariteit van dit product een vereiste is. De specificatie in de centrale onderzoeksvraag voor lamineer- of injectietechnieken betreft de te gebruiken productieprocessen voor het gedeelte van de thermoharde composiet. De centrale onderzoeksvraag is vervolgens verder uitgewerkt naar onderzoeks-deelvragen.

Onderzoeks-deelvragen

1. Hoe kunnen EoL kunststoffen en EoL thermoharde composieten worden gekarakteriseerd en voorbereid voor verwerking in samengestelde (hybride) producten?
2. Hoe kunnen EoL kunststoffen worden ingezet als opvulelementen die kunnen worden gecombineerd met elementen van hergebruikte composiet producten?
3. Hoe moeten elementen worden samengesteld tot een hybride product met goede technische eigenschappen zoals sterkte, stijfheid, energie-absorberend vermogen en thermische isolatie?
4. Hoe moeten producten worden ontworpen om tijdens de gebruiksfase geen milieubelasting te veroorzaken?
5. Hoe moeten producten worden ontworpen om aan het eind van het leven ook weer efficiënt te kunnen worden hergebruikt?
6. Wat is de economische haalbaarheid en de milieutechnische impact van het product (de business-case)?

Werkpakketten

De onderzoeks-deelvragen zijn de basis geweest voor de vorming van de werkpakketten (WP) in het project waarin de deelvragen verder zijn behandeld. Tussen haakjes staat achter de titel van het werkpakket welke onderzoeks-deelvragen er zijn behandeld.

Werkpakket 1: Karakterisering en voorbehandeling EoL materialen	(1)
Werkpakket 2: Ontwikkeling van opvullingselementen	(2)
Werkpakket 3: Ontwerp en ontwikkeling demonstrators	(3)
Werkpakket 4: Onderzoek demonstrators	(4 en 5)
Werkpakket 5: Analyse onderzoeksgegevens t.b.v. business case	(6)

Het project is geleid en uitgevoerd door (docent) onderzoekers van het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) in samenwerking met de projectdeelnemers (zie Bijlage 1). Tevens is er door vele studenten gewerkt aan deelopdrachten in de vorm van stage, afstuderen of opdrachten binnen minor- of masterprogramma's (zie Hoofdstuk 4).

Regiodeal Overijssel

Gedurende het project is er extra financiering gekomen voor aanvullend onderzoek in het project vanuit de provincie Overijssel: de Regiodeal. Hiermee is onderzocht op welke wijze gerecyclede kunststoffen kunnen worden gebruikt voor het 3D-printen van productiemallen voor de Hergebruik EoL composiet methodiek en is er een start gemaakt met het onderzoeken van het lange-duurgedrag van producten van hergebruikte kunststoffen.

Stuurgroep

Voor het project werd een stuurgroep aangesteld. Deze stuurgroep had als belangrijkste taken 1) het bewaken van de projectuitvoering, 2) het kritisch beoordelen van de relevantie van de gestelde projectdoelen gedurende de uitvoering van het project en 3) het signaleren van eventuele zich ontwikkelende projectrisico's. De stuurgroep bestond uit:

Ir. Martin van Dord	(NRK en Holland Chemistry)
Ir. Ben Drogts	(BiinC en vertegenwoordiging van CompositesNL)
Bas Reimert	(Reimert Bouw en Infra)
Drs. Klaas van der Sterren	(Rijkswaterstaat)

Expertgroep

Voor het bewaken van een aantal belangrijke kwaliteitskenmerken van het onderzoek en de onderzoeksuitvoering was voor het project een expertgroep aangesteld. De expertgroep bestond uit:

Professor Dr. Ruud Balkenende	(TU-Delft)
Ir. Liesbeth Tromp	(Royal Haskoning DHV)
Dr. Jan Jager	(NHL Stenden)
Dr. Wilma Dierkes	(Universiteit Twente)



Leeswijzer

Na dit inleidende hoofdstuk wordt in Hoofdstuk 2 een karakterisering gegeven van de EoL kunststofafvalstromen (thermoharde composiet, 'mix-plastics' en autobanden) en hoe deze verwerkt kunnen worden tot een grondstof voor een hybride product. Hoofdstuk 3 beschrijft het ontwerp en de realisatie van de demonstrators in het project en hoe deze in het gebruik en na de gebruiksfase presteren. De verspreiding van de kennis die is op gedaan in het project wordt beschreven in Hoofdstuk 4. Tenslotte worden in Hoofdstuk 5 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

Zoals vermeld zijn de activiteiten in Werkpakket 5 omtrent de business-case beschreven in een separate lectoraats-rapportage [13].

In de hoofdstukken wordt verwezen naar detailinformatie in de literatuurlijst en de appendices.

2 Verwerking van EoL kunststoffen tot grondstof

In dit hoofdstuk zullen de drie typen EoL kunststoffen worden beschreven en gekarakteriseerd. Daarbij zal worden aangegeven in welke vorm ze beschikbaar komen (of moeten komen) om als grondstof voor verder hergebruik te kunnen worden ingezet.

2.1 Thermoharde composieten

In het vorige RAAK-MKB-project, 'Industrieel hergebruik van EoL thermoharde composieten' is een uitvoerige evaluatie gedaan van de verschillende soorten en hoeveelheden van deze materialen [7]. De belangrijkste afvalstromen zijn rompen van polyester jachten en rotorbladen van moderne windmolens.

Voor een industriële verwerking van deze EoL materialen wordt in verband met economische haalbaarheid van de nieuw te produceren producten, er vooralsnog van uitgegaan dat dit in de vorm van vlokken moet gebeuren. Een belangrijke uitkomst van het vorige project is dat het type vezelversterking in het EoL composiet sterk bepalend is voor het type vlok dat verkregen wordt. In het geval van een random versterking (versterking door matten of middels glas/hars-sputten) worden meer plaatvormige vlokken verkregen. In het geval van meer georiënteerde versterking (versterking door weefsels, legfels of middels wikkelen of pultrusie) worden meer naaldevormige vlokken verkregen. Figuur 2.1 toont de typische verschillen.

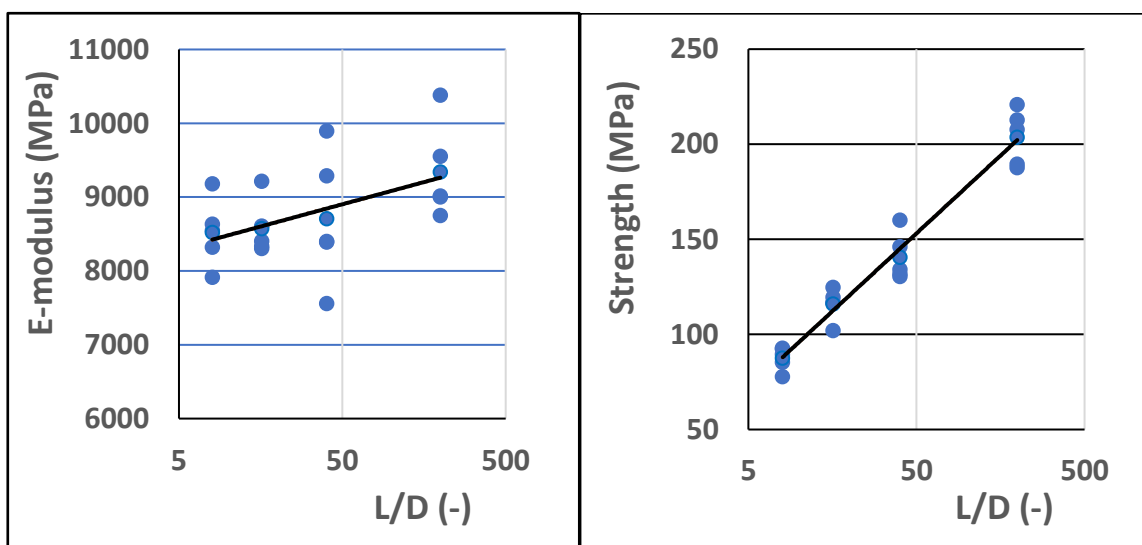


Figuur 2.1 Verschil vlok-geometrie door verschil versterkingstype in EoL-composiet (links: uit glasmat-versterkt GVK /rechts: uit UD-versterkt GVK)

L/D-verhouding vlokken

De vlokgeometrie heeft een grote invloed op de zogenaamde L/D-verhouding. De L/D-verhouding is de verhouding tussen de maximale lengte (L) en de kleinste dikte (D) van de gebruikte vlok. Deze verhouding is sterk bepalend voor het versterkende vermogen van de vlokken wanneer ze toegepast worden in een nieuw product. In voorgaand onderzoek in 2017 is dit geconstateerd aan de hand van onderzoek naar de sterkte van een buigstaaf die is samengesteld uit voor het onderzoek vervaardigde stroken met een bepaalde L/D-verhouding [14]. Door onder gecontroleerde omstandigheden laminaten te maken en hieruit stroken te zagen met een goede gedefinieerde dikte en lengte kon een gericht onderzoek naar het effect van de L/D-verhouding op mechanische eigenschappen gedaan worden. De resultaten zijn overdraagbaar naar vlokken met een bepaalde L/D-verhouding. De reden dat er geen vlokken gebruikt zijn voor het L/D-onderzoek is dat deze altijd voorkomen met een range van afmetingen en dus ook met een range van L/D-verhoudingen.

Het bleek uit het onderzoek dat de buigstijfheid van de buigbalk die was samengesteld uit stroken niet sterk afhangt van de L/D-verhouding. Maar de buigsterkte bleek echter wel sterk samen te hangen met deze verhouding. Zie Figuur 2.2.



Figuur 2.2 Effect van L/D-verhouding van stroken op buigstijfheid en – sterkte

Deze bevindingen komen overeen met die bij andere composietproducten die zijn versterkt met versterkingsvezels met een eindige lengte. Voor thermoplasten met versterking door discontinue vezels is de relatie tussen L/D-verhouding en mechanische eigenschappen uitvoerig onderzocht. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen Short Fibre reinforced Thermoplastics (SFT, gemiddelde vezellengte tot 1 mm) en Long Fibre reinforced Thermoplastics (LFT, gemiddelde vezellengte tussen 1 en 10 mm). Bij de SFT-materialen is de E-modulus al op een substantieel percentage van wat bij continue vezelversterking (oneindige vezellengte) gehaald kan worden. Maar pas bij LFT-materialen (L/D-verhouding van 50 of hoger) komen ook de treksterkte en de impactsterkte op een substantieel percentage in vergelijking tot continue vezelversterking [14].

Voor de vlokken die ontstaan door het shredderen van EoL composietproducten wordt een range van L/D-verhoudingen gevonden meestal tussen 10 en 70. De lage waarden (10 tot 40) worden gevonden voor producten met random versterking en die plaatvormige vlokken opleveren (zie linker foto in Figuur 8). De hogere waarden (40 tot 70) worden gevonden voor producten met continu-versterking en die splintervormige vlokken opleveren (zie rechter foto in Figuur 2.2). In sommige gevallen, zoals bij het shredderen van gewikkelde buizen van glasvezelversterkte epoxy (GRE) is de L/D-verhouding vrij hoog omdat de vlokken erg dun zijn en lang, zie de vlokken gemaakt door projectpartner CRC in Figuur 2.3. In dat geval wordt een range van L/D-verhoudingen gevonden van 50 tot 150.



Figuur 2.3 Vlokken gemaakt door shredderen van gewikkelde GRE-buizen

Glasgewichtsgehalte van vlokken

Het gehalte aan vezelversterking in het EoL-materiaal hangt sterk af van het type versterking dat gebruikt is voor het EoL product en het verwerkingsproces. Omdat de samenstelling van de vlokken bepaald door de samenstelling van het EoL-materiaal waar ze van gemaakt zijn hangt het gehalte aan vezelversterking in de vlokken samen met het gehalte in het EoL-materiaal. Dit is in veruit de meeste gevallen glasvezelversterking en Tabel 2.1 toont de glasvezelgewichtsgehaltenes afhankelijk van type versterking en verwerkingstechniek.

Versterking	Spray-up	SMC	Lamineren	Injectie	Wikkelen	Pultrusie
Mat	20 – 30 (*)	25 – 35 (*)	25 – 40	35 - 45	NVT	40 – 50
Weefsel	NVT	NVT	40 – 50	50 – 60	40 – 50	60 – 65
0/90-legsel	NVT	NVT	50 – 60	55 – 70	NVT	60 – 65
UD / roving	NVT	NVT	50 – 60	55 – 70	60 – 70	60 – 70 (**)

Tabel 2.1 Glasgewichtsgehaltenes in (virgin) composieten (in %)

*) In de tabel wordt bij spray-up (glas/hars-sputten) en bij SMC (Sheet Moulding Compound) mat-versterking gebruikt. Deze mat is echter gevormd door het hakken van een roving waarbij bundels gevormd worden (meestal 50 mm lengte) die met een random-oriëntatie de matversterking vormen.

**) Bij een pultrusie-product zal het grootste deel van de gevormde doorsnede bestaan uit unidirectionaal (UD) versterkte kunststof. Vaak worden in deze producten ook matten toegepast (meestal aan de buitenzijden van het profiel) en soms weefsels en legfels. Echter, deze versterkingsvormen zijn altijd in een geringere hoeveelheid aanwezig dan de UD-versterking. Dit hangt samen met de functie van de UD-versterking in het pultrusie-proces.

Harsbasis vlokken

De hars die gebruikt is in het EoL composietproduct waar de vlokken van vervaardigd zijn is van invloed op de verdere verwerking. Over het algemeen wordt aangetroffen: polyester (UP), vinylester (VE) en epoxy (EP). De hechting van de nieuwe inbeddingshars aan de vlokken is afhankelijk van de combinatie, zoals de tabel hieronder laat zien.

	Harsbasis in vlokken		
Harsbasis inbeddingshars	UP	VE	EP
UP	Redelijk tot goed	Redelijk tot goed	Slecht tot matig
VE	Redelijk tot goed	Redelijk tot goed	Slecht tot matig
EP	Goed tot zeer goed	Goed tot zeer goed	Goed tot zeer goed

Tabel 2.2 Hechtkwaliteit tussen vlokken en inbeddingshars

Het effect van hechting op de eindprestatie is duidelijk naar voren gekomen in het onderzoek voor de Provincie Groningen, waarbij vlokken die gemaakt zijn door het shredderen van gewikkelde glas/epoxy-buizen zijn verwerkt tot testplaten. In het geval er polyester inbeddingshars werd gebruikt werd een gemiddelde buigsterkte gevonden van 24 MPa en bij gebruik van epoxy inbeddingshars een gemiddelde buigsterkte van 64 MPa [21].

Vochtgehalte vlokken

Het vochtgehalte in de vlokken is een belangrijke parameter voor de verwerkbaarheid. Als het vochtpercentage te hoog is werkt dit storend op de uitharding van de inbeddingshars. Bij een droog shredderproces zoals dat bij projectpartner CRC wordt toegepast zijn voor verschillende typen EoL-composietproducten vochtgehaltes in de vlokken gevonden tot 1% bij continu-versterkte producten en tot 2% bij random versterkte producten, zie (Appendix 3). Voor een goede uitharding tijdens hergebruik met gebruikmaking van een thermoharde polyester- of epoxy-hars wordt gesteld dat het vochtgehalte in de vlokken ten hoogste 1% mag zijn. Dit betekent dat voorafgaand aan het gebruik van de vlokken het vochtgehalte moet worden gecontroleerd en, afhankelijk van de uitkomst moeten worden gedroogd.

De eigenschappen en minimale eisen die te stellen zijn aan vlokken, gemaakt door het shredderen van EoL composietproducten staan weergegeven in Tabel 2.3.

Versterking	Random	Continu	Eis/effect op prestatie
L/D	10 tot 50	40 tot 70	Minimaal 50 voor versterking
Vezelgehalte	20 tot 40 gew. %	40 tot 70 gew.%	Hoger: meer stijfheid en sterkte
Hars-basis	polyester/epoxy	polyester/epoxy	Zie Tabel 2.2
Vochtgehalte	0 – 2 gew.% (*)	0 – 1 gew.% (*)	Maximaal 1% voor verwerking

Tabel 2.3 Samenvatting van eigenschappen en minimale eisen van vlokken

2.2 Mix-plastics

De mix-plastics, ook wel aangeduid met DKR 350 is erg heterogeen van samenstelling, zie foto's in Figuur 2.4. Bovendien kan de samenstelling van batch tot batch sterk verschillen. DKR-350 bestaat voor minstens 90 % uit een mengsel van afvalthermoplasten (PE, PP, PS en PET) en voor het resterende deel uit een sterk wisselende samenstelling van andere afvalfracties (organische bestanddelen zoals voedselresten, karton, glas, kleine metaaldeeltjes, etc.), zie ook [10].



Figuur 2.4 Foto van DKR-350 ofwel 'mix-plastics' (bron: Attero)

Ook al bestaat het grootste deel (90 %) uit thermoplasten, deze zijn onderling verschillend in smelttemperatuur (zie Tabel 2.4) maar zijn ook in gesmolten toestand niet mengbaar, zoals dat bij de meeste combinaties van thermoplasten het geval is.

Thermoplast	Glastemperatuur (°C), richtwaarde	Smelttemperatuur (°C), richtwaarde
PE (LDPE)	– 120	+ 110
PE (HDPE)	– 120	+ 130
PP	0	+ 160
PS	+ 100	+ 230
PET	+ 80	+ 260

Tabel 2.4 Glastemperatuur en smelttemperatuur van thermoplasten in DKR-350

Voor een verdere verwerking moet de DKR-350 vershredderd worden tot vlokken. In verband met gezondheidsrisico's moet het materiaal bij voorkeur heet (80 °C) worden gewassen om bacteriën en schimmels te doden en substraten voor latere groei van bacteriën en schimmels te verwijderen. Deze behandelingen van shredderen en wassen worden standaard toegepast door projectpartner Attero en leiden tot een industrieel verwerkbaar grondstof, zie Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Geshredderde en gewassen DKR-350, verkregen van Attero

De wisselende samenstelling van DKR-350 is een probleem voor een continue verwerkbaarheid. Er is aan de hand van scenario's gekeken op welke manier de DKR-350-samenstelling in de toekomst kan verschuiven. Met name door toekomstige verbeteringen in voorsortering van afvalkunststoffen kan in de hand gewerkt worden dat de verwerkbaarheid van DKR-350 nog slechter wordt [16]. De eisen die voorlopig aan DKR-350 gesteld worden voor verder hergebruik in hybride toepassing zijn beperkt tot de volgende twee:

- Geshredderd tot vlokken of korrels
- Heet gewassen en gedroogd

Er zijn door de onderzoekers van het lectoraat samen met studenten vele pogingen gedaan om de DKR 350-fractie te verwerken en tot een nuttig kernmateriaal te maken. Dit is gedaan door de fractie te verwarmen, al of niet in combinatie druk. De doelstelling was om een samenhangend geheel te krijgen met voldoende porositeit waardoor het gebruikt zou kunnen worden als een verende, energie-absorberende kern. Een andere toepassing zou kunnen zijn om het te gebruiken als een warmte-isolerende kernlaag. Het bleek echter niet mogelijk om tot een goed resultaat te komen omdat het resultaat ofwel te weinig samenhang vertoonde en makkelijk uit elkaar viel, ofwel veel te massief was en daardoor niet meer verend en/of isolerend werkte. Er is ook geprobeerd om andere kunststof-afvalstromen bij de DKR 350-fractie bij te mengen om wel een beter resultaat te krijgen maar dit is niet voldoende gelukt.

2.3 Autobanden

Autobanden zijn gecompliceerd in opbouw en zijn ook zeer divers in afmetingen. Om hiervan een beeld te krijgen zijn door RecyBEM een partij van 100 stuks aselekt verzamelde autobanden via Euroband in Werkendam geleverd voor onderzoek. Deze zijn bij Poly Products in Werkendam opgemeten, geregistreerd naar type en genummerd, zie Figuur 2.6.



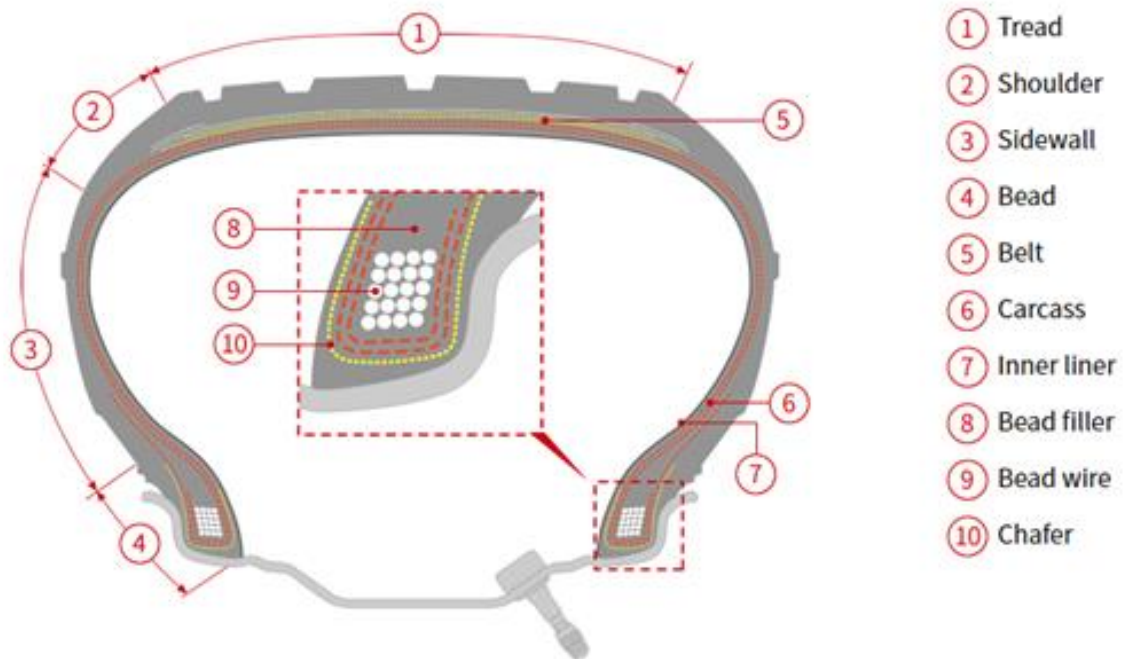
Figuur 2.6 Registratie van 100 stuks autobanden bij Poly Products

Gangbare kenmerken van de maatvoeringen van autobanden zijn de breedte (B), het hoogte-percentages (h) en de diameter van de velg (D). Het hoogte-percentages is de hoogte die de band uitsteekt buiten de velg als percentage van de diameter van de velg. In Tabel 2.5 wordt een overzicht gegeven van de minimale en maximale waarden van deze parameters die in de partij van 100 banden zijn gevonden. De tabel geeft een belangrijk inzicht voor het onderzoek omdat het laat zien hoe uiteenlopend de maatvoeringen van de banden zijn en dit standaardisatie in processen voor hergebruik bemoeilijkt.

Parameter maatvoering	Minimum	Meest voorkomend	Maximum
Breedte (B) in mm	105	205	295
Hoogte (h) in %	30	65	80
Diameter velg (D) in inch	13	16	22

Tabel 2.5 Minimale en maximale waarden van maatvoeringen in de partij autobanden

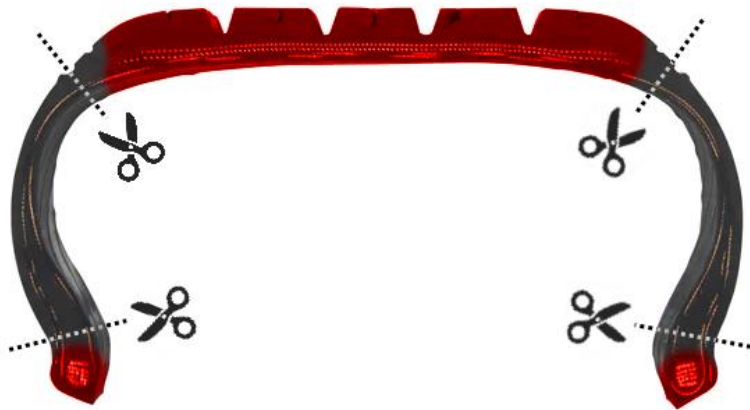
Onderzocht is op welke wijze de banden verkleind kunnen worden en tot welke vorm en afmetingen om geschikt te zijn voor hergebruik in hybride toepassingen. Een probleem bij het verkleinen van een autoband is de aanwezigheid van staalversterking. Dit wordt getoond in Figuur 2.7, waarin de staalverwerking aangegeven staat in de hiel van de band (nummer 9) en vaak ook verwerkt in het loopvlak (nummer 5). De aanwezigheid van staal maakt snijden onmogelijk. Ter plaatse van het staal moet geknipt worden of gezaagd met een fijne vertanding. Waar zich geen staal bevindt kan gesneden worden of gezaagd met een grove vertanding, bijvoorbeeld met een decoupeerzaag. Een alternatief is watersnijden dat door alle materialen snijdt, dus tegelijk door rubber en door de staalversterking. Echter, dit is geen efficiënte methode omdat de waterstraal niet in een enkele opstelling door de band kan snijden en de band dus in verschillende opspanningen op de waterstraal-machine moet worden gesneden. Een andere moeilijkheid bij watersnijden is de flexibiliteit van het rubber waardoor reeds gesneden delen door de straal gaan klappen.



Figuur 2.7 Opbouw autoband (bron: www.keluckyre.com)

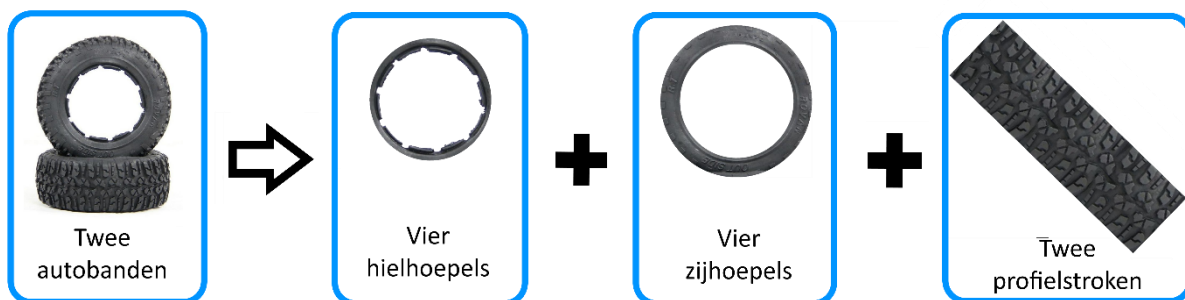
Er bestaan wereldwijd diverse personen en bedrijven die zich toelagen op het verkleinen van autobanden. Het wordt vaak gedaan met zelfgebouwde machines. In sommige landen worden zelfs banden geheel handmatig met messen in stukken gesneden. De handmatige verwerking of de verwerking met zelfgebouwde machines is soms erg onveilig. Maar er zijn ook bedrijven die professionele, veilige machines maken voor het verkleinen van autobanden, bijvoorbeeld EECO (Engineering & Equipment, Co.) in Arizona in de Verenigde Staten (zie www.eaeco.com).

In de meeste gevallen wordt een band in omtreks-richting (tangenciaal) doorgesneden, waarbij de snedes meestal gemaakt worden zoals aangegeven in Figuur 2.8.



Figuur 2.8 Gebruikelijke snijplaatsen bij het snijden in omtreksrichting

Bij een dergelijk snijpatroon ontstaan drie soorten producten: per band 2 hielhoepels (waarin zich de staalversterking van de hiel bevindt), 2 zijhoepels (of: zijwangen) en 1 loopvlak. De loopvlak-delen zijn het meest universeel te gebruiken omdat het vlakke stroken zijn. Figuur 2.9 toont welke delen ontstaan bij het in omtreks-richting versnijden van twee banden.



Figuur 2.9 Resulterende delen bij het in omtreks-richting snijden van twee banden

Radiaal doorsnijden wordt niet veel gedaan. Ten eerste is daarbij het probleem dat telkens twee keer het staal in de hiel moet worden doorgesneden. Ten tweede levert het omega-vormige delen op die niet gemakkelijk voor andere toepassingen kunnen worden ingezet.

De resulterende delen zoals weergegeven in Figuur 2.9 worden als uitgangspunt genomen voor het hybride hergebruik. Radiaal gesneden delen, zoals omega-vormige segmenten, worden niet in het hybride hergebruik meegenomen.

3 Demonstrators

Op basis van de grondstoffen uit EoL kunststoffen die in het vorige hoofdstuk zijn beschreven, zijn in het project middels hybride hergebruik demonstratie-producten (demonstrators) ontwikkeld, gemaakt en getest. Met hybride hergebruik wordt dan bedoeld dat grondstoffen uit verschillende groepen EoL kunststoffen zoals beschreven in Hoofdstuk 2 samen worden gebruikt in één product.

In dit hoofdstuk worden deze demonstrators beschreven. Echter niet alle demonstrators bleken uiteindelijk geschikt voor hybride hergebruik en kwamen binnen het project ook nog niet tot een bruikbaar prototype. Om die redenen worden alleen de twee demonstrators uitgebreid en nader beschreven die gebruik maken van hybride hergebruik én geschikt zijn voor verdere ontwikkeling en opschaling. Dit betreft de inlay van hergebruikt composiet en de geleide-werkbalk. In dit hoofdstuk wordt de totstandkoming van de ontwerpen, de prototypes en de tests van deze demonstrators beschreven. Voor detailinformatie, zoals productiegegevens wordt verwezen naar andere rapportages en naar Appendix 4.

De andere demonstrators, waarbij aanvankelijk hybride hergebruik was beoogd, maar die uiteindelijk niet volgens hybride hergebruik konden worden ontworpen en die ook nog niet tot een bruikbaar prototype zijn gekomen, worden aan het einde van dit hoofdstuk alleen kort beschreven. Hierbij wordt geen detailinformatie gegeven omtrent het ontwerp, de productie en tests. Deze demonstrators betreffen: de prototype dwarsligger van hergebruikt composiet, het printen van mallen voor dwarsliggers van hergebruikt composiet, het muuranker voor composietvloeren en plafondplaten van hergebruikt filterafval.

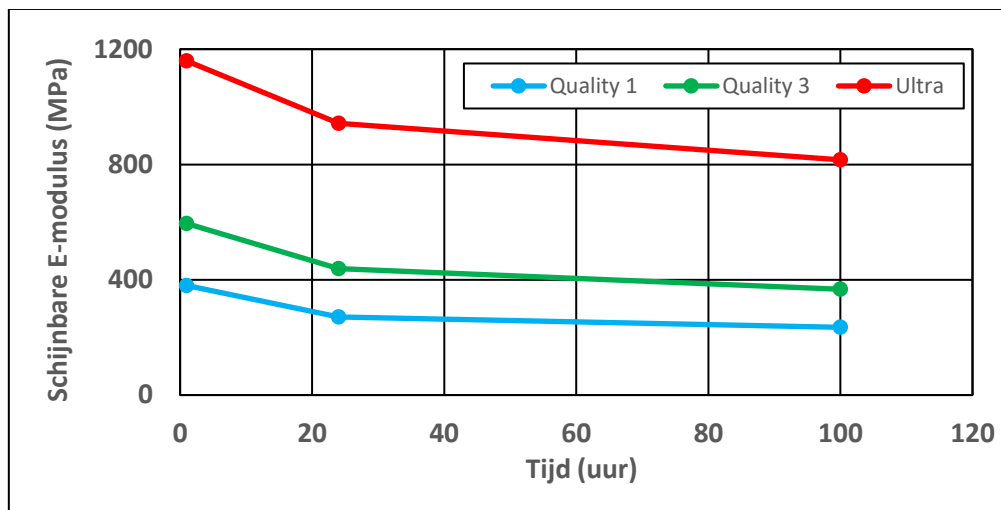
3.1 Inlay van hergebruikt composiet

Projectpartner Save Plastics in Arnhem maakt profielen van thermoplastisch kunststofafval, voornamelijk bestaande uit mix-plastics. Dit kunststofafval bestaat voor een belangrijk deel uit polyolefine thermoplasten, zoals PE en PP. Dit type thermoplasten is vrij ongevoelig voor de inwerking van vocht en daarom zijn deze profielen uitermate geschikt voor buitentoepassingen, zoals palen, planken, dekprofielen, etc. Verder is het materiaal ook taai en stootvast, zodat het ook zeer geschikt is als geleide-laag voor bijvoorbeeld schepen. Echter, mede door het aandeel polyolefine thermoplasten in de profielen zijn mechanische eigenschappen beperkt en vertoont het materiaal veel kruip (vervorming bij permanente belasting). Tabel 3.1 toont de brochure-waarden voor drie klassen materiaal van Save Plastics bij kamertemperatuur.

Eigenschap	Quality 1	Quality 3	Ultra
Buigsterkte (in MPa, volgens ISO 178)	11,6	15,2	24,0
Buigstijfheid (in MPa, volgens ISO 178)	581	890	1424
Treksterkte (in MPa, volgens ISO 527)	9,7	9,4	15,6
E-modulus bij trek (in MPa (volgens ISO 527)	659	957	1490
Breukrek bij trek (in %, volgens ISO 527)	13,8	3,7	1,7

Tabel 3.1 Mechanische eigenschappen profielmateriaal van Save Plastics [14]

De brochure van Save Plastics laat ook zien dat het kruipgedrag van het materiaal sterk is. In Figuur 3.1 zijn curves gegeven van de schijnbare E-modulus in een kruptest volgens ISO 899 bij kamertemperatuur.

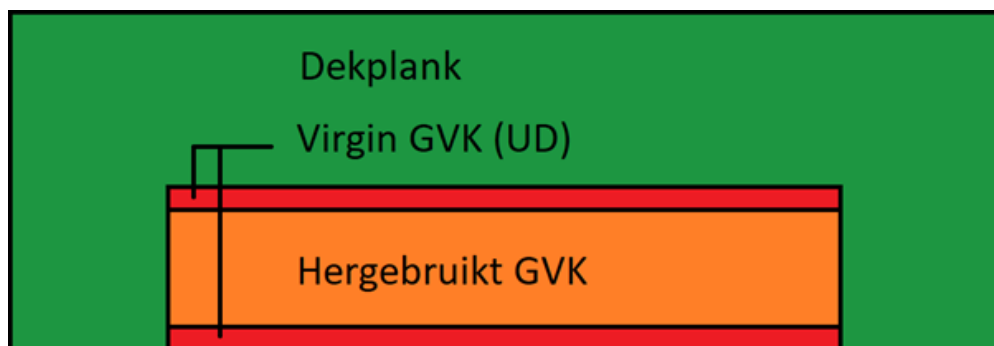


Figuur 3.1 Schijnbare E-modulus materiaal Save Plastics bij kruptest [14]

Uit de figuur blijkt dat de schijnbare E-modulus bij een permanente belasting bij kamertemperatuur na 100 uur ca. 40 % is gezakt en dus nog maar 60 % van de beginwaarde bedraagt. Omdat de doorbuiging recht-evenredig is met de schijnbare E-modulus betekent dit dat ten opzichte van de initiële doorbuiging na 100 uur de doorbuiging van een belaste constructie $((1/0,6) - 1) = \frac{2}{3} = 67\%$ is toegenomen.

De lage stijfheid en het sterke kruipgedrag maakt de toepassing van het materiaal in constructief belaste constructies problematisch en beperkt de markt van Save Plastics. Een voorbeeld van een toepassing waar Save Plastics graag dekplanken voor zou leveren zijn bruggen voor houten fietsbruggen waarvan de hardhouten dekplanken moeten worden gereviseerd.

De dekplanken van een houten fietsbrug zijn gemonteerd op draagbalken die meestal een hart-op-hart afstand hebben van 600 tot 700 mm. Een dekplank ontwikkelen die voldoende stijf en kruipvast is zou beter uitgevoerd kunnen worden in een thermoharde kunststof dan in een thermoplastische kunststof vanwege de betere weerstand tegen kruip. Een toevoeging van versterkingselementen, zoals virgin versterkingsvezels of hergebruikt EoL thermoharde composiet geeft dan een verhoging van de stijfheid. Zo zou de gewenste dekplank met hogere stijfheid en kruipvastheid gemakkelijk te realiseren zijn door deze uit te voeren met een kern van hergebruikt composiet en een buitenmantel van virgin composiet. Een bewijs hiervan zijn de dekplanken van de verkeersbrug de Dinzerbrug in Friesland, beschreven in het vorige RAAK-MKB-project [7]. Echter, dit zou voor de markt van de vervanging van aangetaste hardhouten dekplanken van fietsbruggen een te kostbare optie zijn. Hieruit is het idee ontstaan een verkleinde uitvoering van deze opbouw van hergebruikt composiet te integreren als inlay in een dekplank van Save Plastics, zie Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Principe van inlay van GVK in dekplank van mix-plastics

Door het gebruik van twee UD-laminaten onder en bovenop een kern van hergebruikt EoL composiet (rood in de figuur) ontstaat een sandwichopbouw die een grote bijdrage geeft aan de buigstijfheid en de kruipvastheid van de dekplank. In het vorige RAAK-MKB-project is gevonden dat een kern van hergebruikt composiet een hoge afschuifstijfheid en -sterkte heeft en daardoor de sandwichwerking mogelijk maakt [7]. De inlay wordt aan de onderzijde van de dekplank gepositioneerd. Ondanks de relatief lage stijfheid van de dekplank ten opzicht van de inlay geeft deze in samenwerking met de inlay toch een significante bijdrage aan de stijfheid, mede door de grote afmetingen. Verder beschermt de dekplank de inlay tegen beschadiging door het verkeer dat er boven overheen gaat.

Een eerste haalbaarheidsstudie naar de productie van deze hybride profielen is uitgevoerd door plankprofielen en dekplanken van Save Plastics te voorzien van een uitgefreesde sponning. Hierin werd de inlay aangebracht door handlamineren. Een probleem is de zeer slechte hechting tussen het materiaal van Save Plastics (polyolefine-basis) en de thermoset inlay. Een goede, afschuif-vaste verbinding tussen inlay en dekplank is noodzakelijk voor een goede mechanische werking van het samenstel. Voor de eerste praktijktests zijn daarom houtschroeven 4 x 40 mm in de hoek van de sponning ingeschroefd, waarbij de kop zodanig uitstak dat deze met de inlay kon worden geïntegreerd tijdens het lamineren, zie Figuur 3.3.



Figuur 3.3 Principe van verankering van de inlay door middel van schroeven

In Bijlage 4 staan foto's van de productie van inlays in 4 plankprofielen 3 dekprofielen bij Save Plastics in Arnhem op 8 januari 2020. Figuur 3.4 toont de doorsnede van het eindresultaat van een inlay in een plankprofiel.



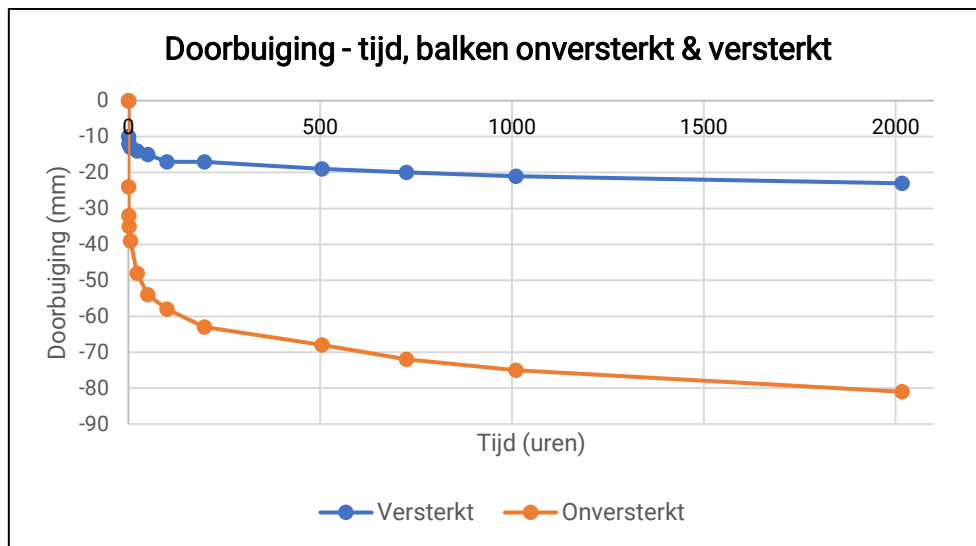
Figuur 3.4 Doorsnede van gerealiseerde inlay in plankprofiel Save Plastics

Belangrijk voor de werking van het principe van de inlay is dat deze een verhoging geeft van de stijfheid en een verbetering van de kruipvastheid van de profielen van Save Plastics. Dit is getest met een tweetal sets profielen van Save Plastics die statisch zijn belast in een driepunts-buigopstelling, zie Figuur 3.5. Dit is een zogenaamde 'dood-gewicht kruiptest' waarbij een gewicht aan het midden van het profiel is bevestigd, wat zorgt voor een continue verticale belasting. In elke set van twee profielen is het ene profiel voorzien van een inlay en het andere niet. De set van twee profielen links op de foto zijn plankprofielen, waarbij de rechter van de twee is voorzien van een inlay. De set van twee profielen rechts op de foto zijn dekprofielen, waarbij de rechter van de twee is voorzien van een inlay. Het belastings-niveau is ingesteld op 25 % van de maximale belastbaarheid van het onversterkte profiel in de set. De kruiptests zijn 2000 uur gemonitord. Details van de tests zijn beschreven in [15].



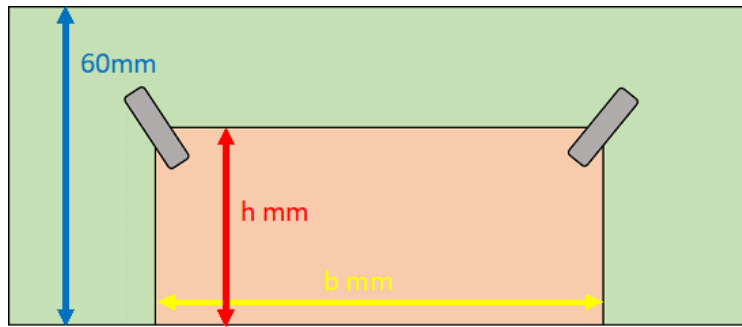
Figuur 3.5 Dood-gewicht kruiptest met twee sets profielen

De doorbuigingscurves van de dekprofielen zijn weergegeven in Figuur 3.6. De oranje punten tonen de gemeten doorbuiging van het profiel zonder inlay (onversterkt) en de blauwe punten de gemeten doorbuiging met inlay (versterkt). De lijnen tonen dat zowel de elastische (initiële) doorbuiging als de kruipvervorming aanzienlijk zijn gereduceerd door de toepassing van de inlay.



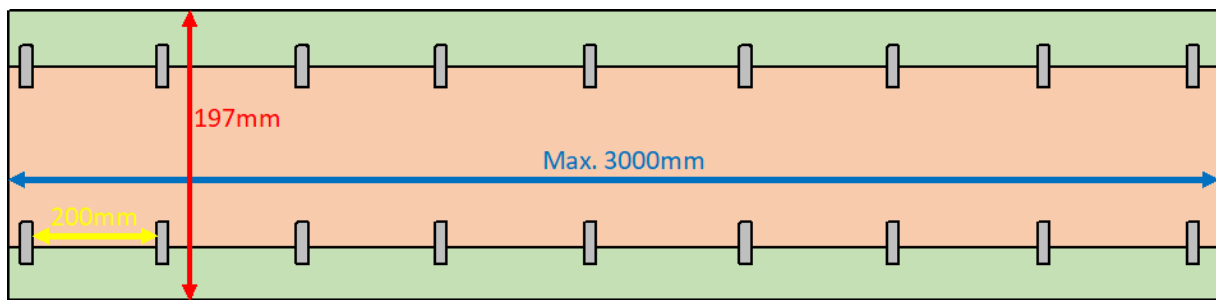
Figuur 3.6 Doorbuigingscurves van de twee balkprofielen

Er is onderzocht op welke wijze een industriële vervaardiging voor Save Plastics opgezet kan worden. Uitgangspunt zijn de standaard dekplanken van Save Plastics met een doorsnede van (BxH) 197 x 60 mm gemaakt van thermoplastisch afvalplastic in Quality 1, die aan de onderzijde worden voorzien van een inlay. Hierbij is onderzocht op welke wijze de afschuiving van de inlay ten opzichte van het profiel van mix-plastics kan worden verhinderd. De methode die naar voren kwam als effectief en goed in het vervaardigingsproces op te nemen is het plaatsen van pultrusie-staafjes in de hoeken, zie Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Afschuifverhinderende verankering m.b.v. pultrusietaafjes in de hoeken

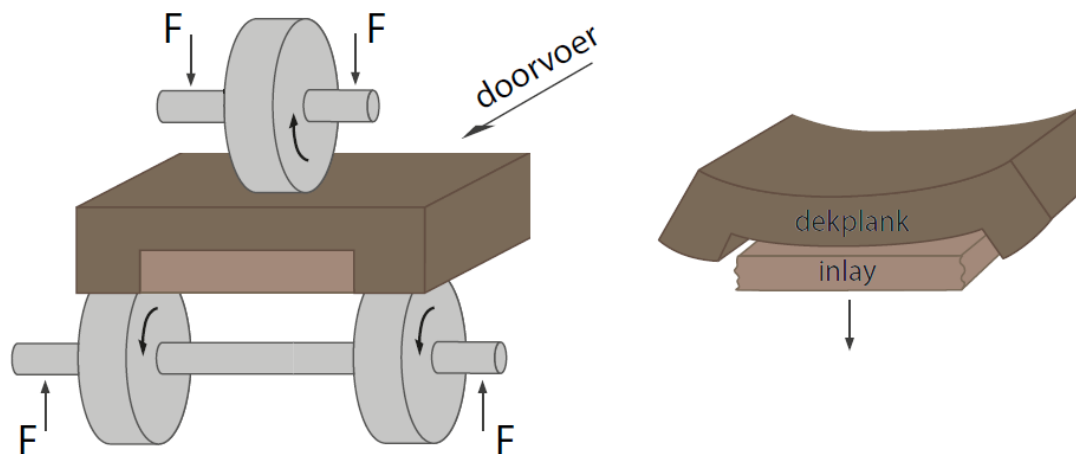
Onbekenden in het ontwerp zijn de breedte (b) en de hoogte (h) van de inlay. Maatgevend voor het ontwerp van de dekplank met inlay voor de toepassing in fietsbruggen is dat deze bij een oplegglengte van 700 mm en met een puntlast in het midden van 5000 N en maximale doorbuiging mag hebben van 3,5 mm (1/200). Voor de opbouw van de inlay zoals weergegeven in Figuur 3.2 is met behulp van een rekenprogramma [15] een studie gedaan naar de doorbuiging als functie van de opbouw van de inlay en de afmetingen hiervan. Hieruit is naar voren gekomen dat een inlay met breedte $b = 110$ mm en een hoogte van $h = 20$ mm hieraan voldoet bij een zo laag mogelijk materiaalgebruik van de inlay. Daarnaast is met het berekeningsprogramma de onderlinge afstand bepaald van de pultrusietaafjes in profielrichting. Met ronde pultrusietaafjes met een diameter van 4 mm bleek de hart-op-hart afstand van 200 mm te voldoen, zie Figuur 3.8. Dit is middels mechanische tests gevalideerd [15].



Figuur 3.8 Hart-op-hart afstand van pultrusietaafjes in de hoeken

Op basis van deze eerste verkennende studie kan de productie van dekplanken met een inlay van hergebruikt composiet verder worden opgeschaald. Basis-principe hierbij is dat de dekplank zelf als mal wordt gebruikt doordat de gefreesde holte (onderzijde in het eindresultaat) tijdens de productie naar boven wordt gelegd en de kopsen kanten van de profielen tijdelijk vloeistofdicht worden afgesloten. Hierna kunnen van boven de versterkingsvezels en vlokken in de holte worden gebracht waarna het geheel kan worden afgegoten met een koud-hardend polyester harssysteem.

Tot slot is onderzocht op welke wijze bij het einde van de gebruiksduur (of levensduur) van de dekplank met inlay de twee verschillende materialen (thermoplastische dekplank en thermoset inlay) gescheiden kunnen worden. Het blijkt dat dit eenvoudig kan door de dekplank met inlay sterk te buigen over de breedte, waarbij de inlay zich aan de trekzijde bevindt. Ter plaatse zal de inlay met de pultrusietaaf-verbindingspunten los springen van de holte in de thermoplastische dekplank. Door deze behandeling voortschrijdend over de lengte van het profiel uit te voeren zal de inlay uit de dekplank komen. Figuur 3.9 toont het principe van deze methode door de plank door een set van drie wielen te drukken die de plaatselijke buiging teweeg brengen.



Figuur 3.9 Principe van plaatselijk buigen om de inlay los te breken van de dekplank

Conclusies en samenvatting

Geconcludeerd kan worden dat het integreren van een thermoset inlay in een brugdekplank die grotendeels bestaat uit mix-plastics een sterke verhoging geeft van de stijfheid en weerstand tegen kruipvervorming. Zo kan een dekplank met doorsnede (BxH) van 197 x 60 mm met een thermoset inlay (bxh) van 110 x 20 mm voldaan worden aan de eisen die gesteld worden voor dekplanken van fietsbruggen.

De dekplanken zijn industrieel te vervaardigen door deze te voorzien van een uitgefreesde of gevormde sponning van 110 x 20 mm waarin de inlay wordt aangebracht met een koudhardend polyester-systeem. De weerstand tegen afschuiving van de inlay ten opzichte van de dekplank wordt verzorgd door het integreren van pennen van 4 mm composiet-pultrusie. Het geheel is ontworpen voor hergebruik; door geforceerd dwars buigen van het profiel kan de inlay uit de dekplank worden gehaald. Op deze manier kan het thermoplastdeel van het thermosetdeel gescheiden worden en kunnen beide delen via de eigen route opnieuw worden gerecycled / hergebruikt.

3.2 Geleide-werkbalk

Geleide-werkbalken zijn geleiders van schepen bij bruggen en sluizen. Ze zijn horizontaal gemonteerd in een aantal rijen boven elkaar tot een geleide-werk. Traditioneel worden hiervoor hardhouten balken gebruikt, vroeger inheemse hardhoutsoorten zoals eiken maar de laatste decennia tropische hardhoutsoorten zoals azobé. In de kolk van de brug of sluis worden deze balken direct op de kadewand gemonteerd. In de toeloop naar de brug of sluis (de 'fuik') worden de balken vaak gemonteerd op verticale palen van hardhout of geconserveerd staal. De laatste decennia worden de geleide-werkbalken steeds meer uitgevoerd als stalen U-profiel waarin een blok zachte kunststof (meestal UHMWPE) is gemonteerd aan de zijde waar direct contact met het schip is. Figuur 3.10 toont een voorbeeld van geleide-werkbalken bij een brug. In dit voorbeeld is de wand van de kolk bekleed met hardhouten geleide-werkbalken en is de fuik voorzien van geleide-werkbalken bestaande uit stalen U-profielen met kunststof blokken.



Figuur 3.10 Geleidewerkbalken van hout (in kolk) en staal/kunststof (in fuik)

In het vorige RAAK-project zijn wrijfgordingen voor remmingwerken gemaakt van hergebruikt composiet [7]. Remmingwerken hebben een andere functie: ze dienen om schepen voor de brug of sluis af te remmen en aan te meren om te wachten in de zogenaamde voorhavens.

Voor het ontwerpen van een hybride geleide-werkbalk die hergebruikte kunststoffen bevat, is als eis gesteld dat het nieuwe ontwerp vering moet krijgen als extra functie t.o.v. de traditionele geleide-werkbalken van hout of staal/kunststof. Dit betekent dat de stootvaste laag aan de zijde van het schip moet kunnen bewegen en dat er achter een verend element geplaatst is. Binnen het lectoraat zijn twee oplossingsrichtingen voor het ontwerp hiervan onderzocht:

- A Stootvaste laag van hergebruikt mix-plastics en verende schuimrubberlaag
- B Stootvaste laag van hergebruikt composiet en verende autoband-delen

Oplossingsrichting A is in een separaat onderzoek uitgewerkt, gerealiseerd en getest [16]. Oplossingsrichting B wordt in dit rapport beschreven [17].

Voor de Oplossingsrichting B is uitgegaan van een mogelijke schampbelasting door een pleziervaartuig die onder een hoek van 5° ten opzichte van de vaar-as de geleide-werkbalk schampt. Er wordt ervan uitgegaan dat de maximale kracht die hierdoor plaatselijk op de geleidewerkbalk uitgeoefend wordt 15 kN bedraagt. Het verende deel dat gemaakt is van autoband-delen moet 25 % van de hoogte kunnen inveren en daarbij als reactie een drukspanning geeft van 3 MPa. De andere eisen voor de geleide-werkbalk en de onderbouwing ervan zijn te vinden in [17]. Door middel van een methodisch ontwerpproces is een ontwerp ontwikkeld voor een verende geleide-werkbalk waarbij het verende onderdeel wordt gevormd door delen van oude autobanden.

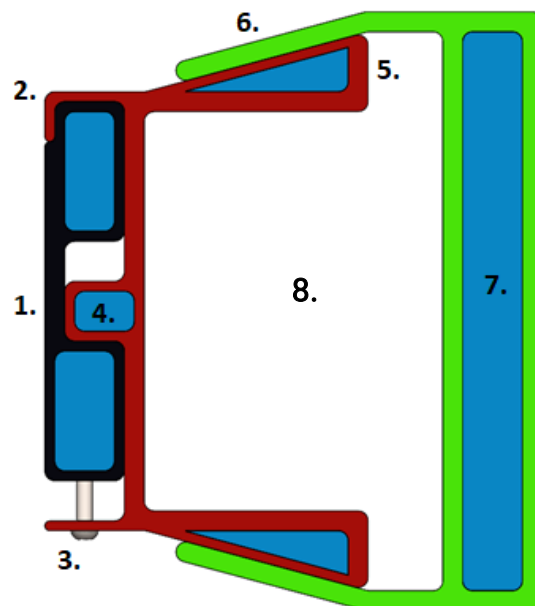
Het ontwerp bestaat uit vier onderdelen:

- | | | |
|----|----------------|--|
| 1. | Montageprofiel | Voor montage op de kade |
| 2. | Achterkast | Houder van autoband-delen |
| 3. | Kern | Op basis van opgevouwen looppdelen |
| 4. | Voorkast | Stootbumper met kern van hergebruikt composiet |

In Figuur 3.11 is de doorsnede gegeven van het samenstel. Hierbij is het onderdeel met de zwarte buitencontour het montageprofiel (1). Bij de montage van de geleide-werkbalk wordt dit onderdeel eerst op de kade-wand gemonteerd. Het onderdeel met de bruine buitencontour is de achterkast (2, 3, 4 en 5), waarbij te zien is dat de haak van de achterkast (2) over de bovenkant van het montageprofiel geplaatst kan worden, waarna aan de onderzijde (3) de achterkast geborgd kan worden met een bout.

Er is onderzoek gedaan naar het optimale gebruik van autoband-delen om de gewenste verende werking te krijgen in de geleide-werkbalk. De uitkomst was dat een strook van het loopdeel van de autoband die sinusvormig is opgevouwen hiervoor het beste dienst doet [17]. Om de kern van opgevouwen loopdelen van autobanden te kunnen fixeren is er een verdikt gedeelte (4) aanbracht in de achterwand. Dit gedeelte heeft stevigheid om de opgevouwen loopband middels montage-punten op zijn plaats te houden.

Om de beweging van de voorkast ten opzichte van de achterkast mogelijk te maken is de achterkast voorzien van schuin uitlopende delen (5). Het deel met de groene buitencontour is de voorkast (6 en 7), waarbij de schuine flanken (6) in de niet-ingeveerde situatie tegen de schuine flanken van de achterkast aanliggen. De blauw getekende kernen zijn gemaakt van hergebruikt composiet, waarbij deze kern in de voorkast een extra grote dikte heeft (7) ten behoeve van robuustheid voor het contact met schepen. De kern van opgevouwen loopdelen bevindt zich in de holte van het samenstel (8). Deze kern van opgevouwen loopdelen is niet ingetekend.



Figuur 3.11 Doorsnede verende hybride geleidewerkbalk (verende kern niet getekend)

Door mechanische tests is de optimale veerconstante per eenheid van lengte bepaald als functie van de hoogte van het opgevouwen loopdeel en het aantal vouw-lussen per eenheid van lengte [17]. In het prototype geleide-werkbalk van 500 mm lengte heeft een opgevouwen loopdeel met een breedte van 180 mm, een hoogte van 150 mm en 4 lussen de optimale veerstijfheid. Een optimale veerstijfheid zorgt ervoor dat bij 25 % inveren de eerder genoemde drukspanning van 3 MPa als reactie optreedt. Hiermee is de geleidewerkbalk niet te hard bij aanvaring door een jacht maar ook stijf genoeg om bij de inverting van de geleidewerkbalk de reactiekracht van 15 kN te leveren.

In Figuur 3.12 is de gemonteerde situatie van het opgevouwen loopbanddeel in de achterkast te zien. De afmetingen van het loopdeel voor het opvouwen waren 180 x 1600 mm (een loopbanddeel van de autobanden van de meeste personenwagens heeft een lengte van ca. 1,9 m).



Figuur 3.12 Opgevouwen loopdeel van autoband in achterkast

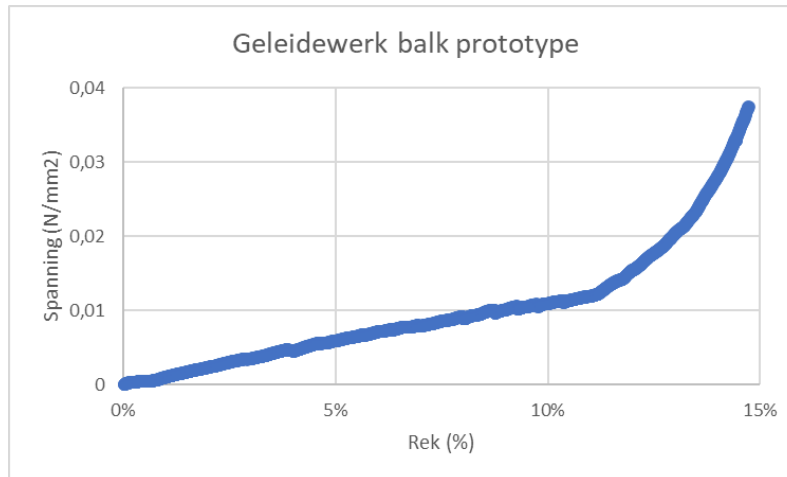
De onderdelen 1 t/m 7 zijn gemaakt door middel van hand-lamineren op houten mallen. De kerndelen van hergebruikt composiet zijn voor het prototype vervangen door PU-schuimstroken die op maat zijn gemaakt als kerndeel. Voor het onderzoek gaf dit gebruik van PU-schuimstroken geen verschil in mechanisch gedrag bij het testen omdat de test van het prototype quasi-statisch is uitgevoerd, waarbij de kerndelen geen of zeer weinig belasting ondervinden. In de toepassing is het gebruik van hergebruikt composiet belangrijk in verband met het kunnen optreden van slag- (impact-) belastingen. Kerndelen van hergebruikt composiet zijn robuust bestand tegen slagbelastingen, terwijl PU-schuim bros is en bij en slagbelasting kan verbrijzelen. Na het monteren van het opgevouwen loopdeel van de autoband op de achterkast wordt de voorkast er vanaf de zijkant in axiale richting over geschoven. Details van de vervaardiging staan in [17].

Het gemonteerde prototype is een geleide-werkbalk van 500 mm lengte, zie Figuur 3.13. Dit prototype is getest in een trekbank om de veerconstante over deze lengte te bepalen en de werking van de inverting van voorkast ten opzichte van de achterkast te onderzoeken [17].



Figuur 3.13 Prototype van 500 mm lengte

De test laat zien dat de gewenste slag voor inverting van 25 % niet gehaald wordt. Al bij 12 % inverting neemt de veerstijfheid sterk toe, zie Figuur 3.14. Deze figuur toont de spannings-rek-curve van de drukproef, waarbij de gemiddelde spanning is uitgezet tegen de indrukingsrek. De sterke toename van de stijfheid ontstaat doordat de voorkast en de achterkast tegen elkaar gaan afsteunen door de te grote afrondingsstralen die het gevolg zijn van het proces van handlamineren. Uit het eerste gedeelte van de curve is verder een veerstijfheid te bepalen van 0,1 MPa, terwijl dit voor het opvangen van de schampbelasting door schepen in dit geval 3,0 MPa zou moeten zijn.



Figuur 3.14 Spannings-rek-curve druktest prototype

Conclusies en samenvatting

Alhoewel de praktijktest nog onvolkomenheden laat zien is het ontwerp van de geleide-werkbalk met een kern van autobanddelen kansrijk voor verdere doorontwikkeling. De te lage veerstijfheid is eenvoudig aan te passen met het aantal lussen loopdeel per lengte [17]. De beperkte slag van 12% als gevolg van het handlamineer-proces kan worden vergroot tot de gewenste 25% door gebruik te maken van een pultrusie-proces om de onderdelen te maken. Dan zijn de afrondingsstralen in de hoeken van de profielen gedefinieerd door de pultrusiematrijs. Hierdoor zullen de delen 5 en 7 niet voortijdig aanlopen.

Zoals aangekondigd zullen in de volgende paragrafen korte beschrijvingen gegeven worden van demonstrators die nog niet tot een bruikbaar prototype hebben geleid.

3.3 Dwarsligger van hergebruikt composiet (korte beschrijving)

Door projectpartner NS worden in Haarlem treinen gereviseerd. De materialen die vrijkomen worden zo veel mogelijk hergebruikt. Doelstelling van de NS is 100% hergebruik [18]. Dit lukt grotendeels maar een bottleneck vormen de composiet interieurdelen. Projectpartner CRC heeft de treininterieur-delen vershredderd tot vlokken. In Appendix 3 staat een intern onderzoek-memorandum met daarin de analyse van deze fractie. Voor de vervaardiging van een prototype dwarsligger voor het spoor met behulp van deze vlokken is uit een betongietmal voor een NS-90 dwarsligger (ter beschikking gesteld door projectpartner Alom) eerst een GVK-schil gelamineerd. Deze schil heeft dezelfde buitendetailering en aansluitingen voor de spoorstaafbevestiging, zie Figuur 3.15.



Figuur 3.15 GVK-schaal gemaakt vanuit NS-90 betongietmal van Alom

De schil diende als een verloren mal waarin de vlokken van de treininterieur-delen en virgin hars en virgin versterking zijn aangebracht. Op deze wijze is het prototype dwarsligger van hergebruikt composiet gemaakt, zie Figuur 3.16.

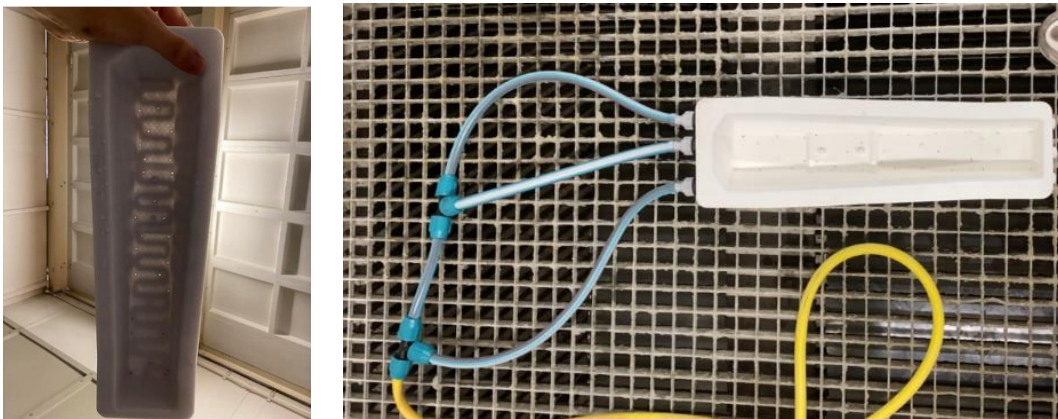


Figuur 3.16 Prototype NS-90-dwarsligger van hergebruikt composiet

3.4 Printen van mallen voor dwarsliggers van hergebruikt composiet (korte beschrijving)

Met projectdeelnemer 3DMZ is onderzocht of een productiemal voor het maken van dwarsliggers van het type NS 90 kan worden vervaardigd door middel van 3D-printen. Uit een selectie van mogelijke compounds om te printen is PLA versterkt met olifantgras (miscanthus) verder onderzocht. Dit is goed met FDM te printen maar een moeilijkheid is dat PLA een vrij lage T_g heeft (60 °C) waardoor de mal niet tegen de hoge uithardingswarmte van de polyesterhars (piek-exotherm) kan. Bovendien heeft het door de FDM-techniek ribbels die goede lossing belemmeren.

Er is met PLA vervolgens een mal geprint met inwendige koelkanalen om het PLA voldoende koel te houden bij de uitharding van de compound in de mal. Bovendien is er een oplossing gevonden voor het ruwe mal-oppervlak. Hiervoor bleek het vacuüm-vormen van een dunne laag PETG over het schaalmodel van de mal van PLA uitstekend te werken. Er ontstaat dan een dunne, gladde laag die de ribbelstructuur afdekt. Hiervoor moesten er wel gaatjes in de mal worden aangebracht voor het aanbrengen van het vacuüm. Figuur 3.17 toont de mal.



Figuur 3.17 Geprinte mal: koelkanalen (links), aansluiting koelwater (rechts)

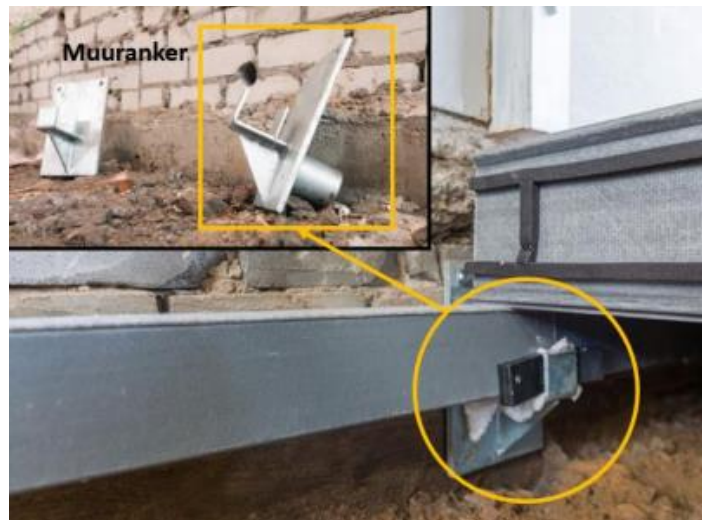
De productie van een dwarsliggerdeel op schaal gaat goed op deze wijze en de vacuüm-gevormd PETG-binnenlaag kan meermalen gebruikt worden, zie Figuur 3.18.



Figuur 3.18 Gelost schaalproduct en PETG binnenlaag

3.5 Muuranker voor composietvloer (korte beschrijving)

Projectdeelnemer Compofloor plaatst composietvloeren als vervanging van oude vloeren in woningen. Het nieuwe vloersysteem wordt momenteel ondersteund middels verzinkt stalen muurankers. Figuur 3.19 toont het detail van een muuranker. Rechtsboven in deze figuur is het vloerprofiel te zien dat hierop afsteunt.



Figuur 3.19 Stalen muuranker van Compofloor en positionering onder vloer

Er is onderzocht of het mogelijk is om een muuranker te maken van hybride hergebruikt kunststof. Het ontwerpproces heeft een prototype muuranker opgeleverd bestaande uit een cilinder van hergebruikt composiet die geïntegreerd is met een GVK-muurplaat. Sterkte-berekeningen hebben echter aangetoond dat het ontwerp nog niet sterk genoeg is. Figuur 3.20 toont het gemaakte prototype muuranker.



Figuur 3.20 Prototype muuranker van hergebruikt composiet

3.6 Plafondplaten van filterafval (korte beschrijving)

Projectdeelnemer Strukton plaatst en onderhoudt klimaat-technische installaties. Voor het filteren van lucht in deze installaties zijn filterpakketten aanwezig waarvan de basis wordt gevormd door een aluminium frame en filterdoeken, zie Figuur 3.21.



Figuur 3.21 Luchtfilter-cassette (ongebruikt)

Gebruikte filters leveren grote hoeveelheden vervuild filterdoek. Er is onderzocht of dit filterdoek kan worden ingezet als onderdeel van hybride hergebruik van kunststoffen. Het filterdoek moest eerst in de vorm van snippers worden gebracht voor verdere verwerking. Vervolgens zijn verschillende manieren onderzocht om de snippers te binden tot een consistent materiaal. Als meest effectieve bindmiddel kwam een latex-emulsie naar voren, waarmee de snippers konden worden gebonden tot geluidsabsorberende plafondplaten, zie prototype-platen in Figuur 3.22.



Figuur 3.22 Prototype-plafondplaten van luchtfilter-vlokken

4 Disseminatie en onderwijs

De verspreiding van de opgedane kennis en de presentatie van de resultaten van het project (kennis-disseminatie) is een belangrijk onderdeel van het project. Dat geldt zowel richting het beroepenveld als naar het onderwijs.

Belangrijk hierbij is dat de kennisverspreiding vanuit het project open is. Er zijn geen restricties aan het verspreiden van kennis die is ontwikkeld binnen het project. Dit is ook uitdrukkelijk medegedeeld aan de deelnemers, zowel schriftelijk als tijdens de startbijeenkomst op 7 oktober 2019. Het legt daarmee ook de verantwoordelijkheid bij de deelnemers om geen kennis in te brengen in het project die vertrouwelijk zou moeten worden behandeld.

4.1 Informatievoorziening projectgroep

RAAK-Nieuwsupdate

Gedurende het project is elk kwartaal een nieuwsupdate gemaakt van de recente ontwikkelingen in het project. Deze update werd verspreid onder de deelnemers aan het project maar werd ook regelmatig verstuurd naar andere belangstellenden. In totaal zijn tijdens het project 8 stuks van dergelijke RAAK-Nieuwsupdates samengesteld en verspreid.

De reacties hierop waren positief. Zo bleef het project onder de aandacht. Stuurgroep-lid Martin van Dord uitte zich meermalen zeer positief over deze informatieverbreiding en heeft het zelfs ten voorbeeld gesteld bij andere RAAK-projecten. Volgens hem snijdt het mes aan twee kanten: deelnemers worden op de hoogte gehouden maar het vormt ook een opbouw van een archief van activiteiten gedurende het project.

Bijeenkomsten georganiseerd vanuit het project: 14 stuks, zie Appendix 2.

4.2 Media-aandacht

Er is veel aandacht voor het onderwerp circulariteit. Daarom zijn er veel vragen geweest vanuit diverse media om interviews en presentaties te geven. Op deze uitnodigingen is in bijna alle gevallen ingegaan om de methode van hergebruik van Windesheim te presenteren. Ook zijn er uitnodigingen geweest voor het deelnemen aan panel-discussies over circulariteit. Daarnaast zijn er ook media-uitingen geweest waar het onderzoek van Windesheim in beschreven werd. Een overzicht is te vinden in Appendix 2.

Interviews, presentaties, paneldiscussies en media-uitingen: 23 stuks, zie Appendix 2.

Wat het project een zeer grote media-aandacht heeft gegeven is het winnen van de RAAK-Award. Deze prestigieuze prijs die Regie-orgaan SiA jaarlijks uitlooft voor toegepast onderzoek middels een RAAK-project werd in 2021 toegekend aan het onderhavige project 'Hybride hergebruik kunststoffen'. Figuur 4.1 toont het blijverraste team in 'Studio Zwolle' die op donderdag 25 november 2021 werden overvallen door de jury van SiA.



Figuur 4.1 Blijdschap bij het krijgen van de RAAK-Award

Naast de vele media-aandacht die deze prijs tot gevolg had werd ook een geldprijs uitgekeerd van € 10.000,-. Dit geld is besteed aan verder onderzoek naar het lang-duurgedrag van producten van hergebruikt composiet. Hiervan is onder andere een kruipopstelling gebouwd en zijn simulaties uitgevoerd naar inwerking van vocht.

Ook in het najaar van 2021 heeft het lectoraat de prestigieuze Deltapremie. SiA heeft in 2021 twee lectoraten deze prijs toegekend, zie Figuur 4.2. De toekenning van deze prijs aan het Lectoraat Kunststoftechnologie onder leiding van lector Margie Topp was gebaseerd op het innovatieve, toegepaste onderzoek van het lectoraat op het gebied van circulariteit, met name de methode van hergebruik van composieten. Het onderhavige RAAK-MKB-project heeft daar substantieel aan bijgedragen.



Figuur 4.2 Uitreiking van de twee Deltapremies van 2021

4.3 Netwerkontwikkeling

Voor de verdere ontwikkeling van het netwerk is gehoor gegeven aan uitnodigingen van branche-organisaties. Zo zijn presentaties gegeven over de methode van hergebruik voor de European Boat Association (EBA) en voor de Nederlandse composiet-branchevereniging CompositesNL (zie Appendix 2). Beide presentaties waren i.v.m. corona on-line maar werden goed bezocht en de presentaties zijn gedeeld met de genodigden. Door de rol van Dr. Jaap van der Woude namens projectpartner EuCIA wordt ook contact gehouden met de Europese composiet-branchevereniging.

In samenwerking met Bouke Veldman van het adviesbureau Horyzon is een studie uitgewerkt voor een industriële verwerking van rotorbladen van windmolens. Deze studie is uitgevoerd voor het initiatief in Noord-Nederland OWIC (Off-shore Wind Innovation Centre) en heeft vervolgens geresulteerd in de stichting DECOM-North die per januari 2022 is opgericht. DECOM-North gaat met behulp van logistieke partijen rondom de Eemshaven en met behulp van de technologie van CRC en Windesheim een proeffabriek bouwen in het Noorden van Nederland voor de verwerking van rotorbladen van windmolens tot profielen voor infra-bouw. Windesheim is bij dit initiatief aangesloten en werkt actief mee door inbreng van technologische kennis.

Vanuit de samenwerking met de NS en de realisatie van het eerste prototype dwarsligger van hergebruikt composiet (zie Hoofdstuk 3) is Windesheim door NS betrokken in het grote Europese ERJU-project (European Rail Joint Undertaken). In dit project worden diverse circulaire oplossingen voor het spoor ontwikkeld. Het project is inmiddels toegekend en Windesheim heeft hierin de rol om een ontwerp te maken voor een dwarsligger van hergebruikt composiet dat voldoet aan de geldende specificaties i.s.m NS en ProRail.

4.4 Onderwijsbetrokkenheid

Het LKT verzorgt input voor de volgende onderwijsactiviteiten:

- Minor Production Engineering
- Minor Applied Mechanics
- Minor Composieten
- Master Polymer Engineering

Binnen alle vier deze onderwijsprogramma's worden colleges over composieten verzorgd, waarbij het vraagstuk van circulariteit van deze materialen ook wordt besproken. Daarbij is verteld over de opzet en de resultaten van het RAAK-project. De invulling van de onderwijsprogramma's heeft plaatsgevonden in afstemming met de betrokken docenten van de afdelingen werktuigbouw, IPO, bouwkunde en civiele techniek van Windesheim in Zwolle en in Almere. Daarnaast werden in deze programma's ook opdrachten gegeven aan de studenten die een bijdrage hebben gegeven aan onderhavig RAAK-project. In het volgende worden deze opdrachten genoemd.

Groepsopdrachten minor programma's Production Engineering en Applied Mechanics (8)

- Guido de Wit, Thom van Riet en Yorn Rudde
 - Productie van spoordwarsliggers uit hergebruikt composiet
 - Opdracht Minor Production, 2020
- David Brakel, Menno Koetsier en Cas de Munck
 - Processen voor verkleinen van autobanden voor rubber kernen
 - Opdracht Minor Production, 2020
- Philip-Jan Grolleman, Friso Wijnbergen en Tomas Vink
 - Continu-verwerking van afvalplastics tot kernmateriaal
 - Opdracht Minor Production, 2020

- Steven de Meer en Freddy Russcher
 - Reductie van kruip in balken van afvalplastic door kruipvaste inlays
 - Opdracht Minor Applied Mechanics, 2020
- Yari Wesseling, Dominic Belksma en Demi Dörenberg
 - Meso-schaal modellering mechanische eigenschappen respons rubber kernen
 - Opdracht Minor Applied Mechanics, 2020
- Pieter Oving, Lesley Tran en Mark Veenstra
 - Constructie en ontwerp composiet muuranker
 - Opdracht Minor Applied Mechanics, 2021
- Matthijs Berculo, Stanley Beeldsnijder en Djurre Wapstra
 - Productieproces composiet inlays in kunststof deklanken
 - Opdracht Minor Production, 2021
- Daniël Zwake en Roel Driessen
 - Productieproces voor constructief schuim van hergebruikt composiet
 - Opdracht Minor Production, 2021

Desk Studies, minor Composieten (6)

Bij de minor Composieten is er een onderdeel Desk Study. Dit is een individuele composiet-gerelateerde opdracht. Hierbij hebben de studenten de keuze uit verschillende onderwerpen, waaronder ook hergebruik van composieten. Voor een onderwerp op gebied van hergebruik van composieten krijgen ze dan elk een actueel vraagstuk uit te werken uit het RAAK-project. Verplicht onderdeel van deze opdracht is dat de student bij minstens twee bedrijven op bezoek gaat om additionele informatie voor het vraagstuk te verzamelen. De meeste bedrijven zijn deelnemers aan het RAAK-project maar er worden ook bedrijven geselecteerd die aanvullende informatie kunnen leveren. Iedere student schrijft een kort verslag en geeft een presentatie over het onderwerp.

De volgende deskstudies over hergebruik van composieten zijn uitgevoerd:

- | | | |
|---|------------------------|--------|
| • Circulair composiet | Dominique van der Laan | (2019) |
| • Dekplanken van hergebruikt composiet | Don Akse | (2019) |
| • Hergebruikt composiet in tuin- en straatmeubilair | Marc van der Veen | (2019) |
| • Spoorbielzen van hergebruikt composiet | Thomas van der Wardt | (2020) |
| • De business case van hergebruikt composiet | Leon de Gooijer | (2020) |
| • Hergebruik van composieten – Pultrusie | Jelle Westeneng | (2021) |

Opdracht in Master Polymer Engineering (1)

Master-student Kim Zandbergen heeft een speciale opdracht uitgevoerd in het kader van haar opleiding Master Polymer Engineering. In deze opdracht heeft zij in samenwerking met projectpartner Compofloor een composiet muuranker met hergebruikt composiet ontworpen en hiervan een prototype gemaakt. Een korte beschrijving hiervan staat in het vorige hoofdstuk over de demonstrators.

Onafhankelijk van de genoemde onderdelen in het curriculum van het onderwijs zijn er ook afzonderlijke stage- en afstudeeropdrachten door het LKT opgesteld en begeleid. Ook in het kader van hergebruik van kunststoffen en composieten in het kader van onderhavig RAAK-project zijn dergelijke opdrachten uitgevoerd door studenten.

Stagiaires (3)

- | | | |
|-----------------------------------|----------------------|--------|
| • Project Mixed Plastics Extruder | Jaron Mol | (2020) |
| • RAAK Rapid Prototyping | Ynze Hokken | (2021) |
| • Verwerken mixed-plastics afval | Wouter van Herwijnen | (2021) |



Afstudeerders (4)

Tijdens het project zijn vier afstudeeropdrachten uitgevoerd. De afstudeerverslagen staan genoemd in de literatuurlijst [15, 17, 19, 20].

- | | | |
|---|-----------------|--------|
| • The Future Composition and Availability of DKR 350 | Myrthe Scholtus | (2020) |
| • The Future of Car Tyre Recycling | Thomas de Jong | (2020) |
| • Productie van gerecyclede thermoplast dekplank met thermoharde versteviging | Arjan van Elmpt | (2021) |
| • Ontwerp van een circulair hybride ligger met autoband kernen | Tom van Heun | (2021) |

Opdracht voor RAAK-Award

Om mee te kunnen dingen naar de RAAK-Award moest er een student-reporter gezocht worden die zorgde voor publiciteit. Dit had vooral als doel om eventueel kans te maken op de publieksprijs. Thema voor deze RAAK-Award was 'Grenzen doorbreken' door middel van toegepast onderzoek aan de hogescholen. Deze taak als student-reporter is ingevuld door IPO-student Dominique Boellaard 2021. Zij heeft tevens in een opname die verzorgd is door Regieorgaan SiA het project ingeleid en de projectleider geïnterviewd, zie de screenshot uit het filmpje in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Screenshot uit film waarbij Dominique de projectleider interviewt

5 Conclusies en aanbevelingen

De drie afvalstromen van moeilijk te recyclen kunststoffen die in dit project zijn onderzocht zijn voor Nederland gekwantificeerd. De stroom EoL thermoharde composieten bestaat grotendeels uit polyester bootrompen en rotorbladen voor windmolens. Bij elkaar bedraagt deze afvalstroom in Nederland momenteel ca. 6.000 ton per jaar. De afvalstroom oude autobanden bedraagt in Nederland momenteel ca. 9 miljoen stuks per jaar. De meest verontreinigde en heterogene kunststof-afvalstroom bestaat uit zogenoemde 'mix-plastics', ook wel aangeduid met DKR 350. Deze afvalstroom bedraagt in Nederland ca. 200.000 ton per jaar.

Het verwerken van EoL thermoharde composieten tot vlokken gebeurt inmiddels op industriële schaal, onder andere door projectpartner CRC. Met deze vlokken kunnen onderdelen van producten worden versterkt, vooral als sterke kern. Dit wordt gedaan met de door Windesheim ontwikkelde methode van hergebruik van composiet. Deze werkwijze heeft in dit project zijn toegevoegde waarde bewezen bij de demonstrator 'profiel met inlay'. Ook zijn vlokken gebruikt in de demonstrators 'dwarsligger van hergebruikt composiet' en de demonstrator 'muuranker' maar van deze demonstrators moet het ontwerp nog worden verbeterd.

Het hergebruiken van oude autobanden is onderzocht door hiervan onderdelen te gebruiken. Deze onderdelen kunnen goed worden gebruikt als veerkrachtige kern in producten die stoten (impact) moeten kunnen opnemen. In de demonstrator 'geleidebalk met verende kern' zijn opgevouwen loopvlakdelen van autobanden succesvol gebruikt als verende kern.

Minder succesvol is het gebruik van de thermoplastische 'mix-plastics' gebleken. Ondanks de vele pogingen om hiervan een nuttig kernmateriaal te maken is dit vooralsnog niet mogelijk gebleken. Om een verende, energie-absorberende kern te realiseren is geprobeerd de snippers van de 'mix-plastics' te binden door het geheel te verwarmen. Het resultaat was dat ofwel het resultaat een veel te losse / zwakke binding gaf ofwel dat er een vrij massief materiaal ontstond dat niet als lichte, veerkrachtige kern dienst kon doen. Ook combinaties met andere thermoplastische afvalstromen zijn onderzocht om een gewenste binding te krijgen maar het is vooralsnog niet mogelijk gebleken een goed resultaat te bereiken.

Een interessante doorontwikkeling die uit de demonstrator 'dwarsligger van hergebruikt composiet' is voortgekomen is de ontwikkeling van een 3D-geprinte productiemal. Het is gebleken dat het mogelijk is om met PLA een mal te printen met koelkanalen zodat deze kunststof met vrij lage Tg (60 °C) toch geschikt is voor het verwerken van thermoset compounds met een hoge piek-exotherm (boven 100 °C). Om het oppervlak van de geprinte mal lossend te krijgen is in de mal een gladde tussenlaag gevormd van PETG met warm-vacuum-techniek. Deze doorontwikkeling is mogelijk gemaakt door de extra financiering van de Provincie Overijssel die verstrekt is om het onderzoek naar hergebruik van kunststoffen en composieten te ondersteunen.

Het project kreeg veel aandacht van de media. Het project is door de jury van de RAAK-Award in 2021 beloond met de eerste prijs. Later, in het voorjaar van 2022 is de methode van hergebruik van Windesheim beloond met de JEC Innovation Award in de categorie Bouw en Infra.

Gedurende het project is veel kennis gedeeld met de projectpartners maar ook buiten het project. Naast het geven van vele interviews en presentaties zijn er ook bijdragen geschreven voor de internationale vakliteratuur (Reinforced Plastics in 2002, bijdrage aan InTech-Open-boek over recycling in 2022).

Het project heeft een grote doorwerking gegeven in het onderwijs. Naast de betrokkenheid van diverse docent/onderzoekers bij het project zijn er vele projecten uitgevoerd door studenten in de vorm van stage, afstuderen of minor-opdrachten. Bovendien zijn belangrijke resultaten uit het project opgenomen in het curriculum van een aantal studierichtingen.



Een aanbeveling is om succesvolle demonstrators zoals 'geleidebalk met verende kern', 'profiel met inlay' en 'dwarsligger van hergebruikt composiet' verder te ontwikkelen. Hier zal de industrie het voortouw in moeten nemen. Voor de dwarsligger van hergebruikt composiet is dit inmiddels al in gang gezet door de NS en ProRail in samenwerking met Windesheim. Het ontwerp van de demonstrator 'muuranker' zal in elk geval sterkte-technisch moeten worden geoptimaliseerd en geschikt gemaakt worden voor productietechnieken met lage kosten.

Een andere aanbeveling is om productontwikkelingen die uit dit onderzoek voortkomen ook op lange-duur prestatie te onderzoeken. De meeste van de ontwikkelingen worden toegepast in een buitensituatie waarin langdurige inwerking optreedt van belastingen en omgevingsinvloeden zoals vocht en UV (zonlicht). Bij het onderzoek naar lange-duur prestatie van producten gemaakt van (hybride) hergebruikte kunststoffen kan gebruik gemaakt worden van de reeds ontwikkelde onderzoeksmethoden in het huidig lopende RAAK-MKB-project 'Lange-duur prestatie van hergebruikt composiet'.

6 Literatuur

- [1] Marsh, G.
Facing up the recycling challenge.
Reinforced Plastics, Volume 45, No. 6, June 2001
- [2] *Composites Recycling – Where are we now?*
Publication of Composites UK, Ed. S. Job et al., 2016
- [3] *Update on Recycling*
ACMA Global Composite Recycling Workshop
Paris, March 7, 2016.
- [4] *Siemens Gamesa pioneers wind circularity: launch of world's first recyclable wind turbine blade for commercial use offshore.*
Press release, 7 September 2021
- [5] Steinigeweg, J.
Review of the suitability of thermoplastic rotor blades in terms of circular economy.
EGU Journal of Renewable Energy Short Reviews, 2021
- [6] Hajonides van der Meulen, T., Bastein, T., Krishna Swamy, S., Saraswati, N., Joustra, J.
Offshore windpark decommissioning
TNO-rapport in opdracht van SmartPort, oktober 2020
- [7] Busschen, A. ten, Topp, M.D.C., Bouwmeester, J. Schreuder, P., Bosman, P., Roetman, E.
Industrieel hergebruik van EoL thermoharde composieten
Lectoraats-rapportage, LKT-RE-106851-1903, september 2019
- [8] Busschen, A. ten
Industrial Re-Use of Composites
Reinforced Plastics, Volume 64, No. 3, May/June 2020
- [9] Busschen, A. ten
Industrial Re-Use of Composites
Waste Material Recycling in the Circular Economy – Challenges and Developments
Ed. Dimitris Achilias, 2022
ISBN 978-1-83969-681-7
- [10] *Infographic Circular Economy for Plastics – The Netherlands*
Website Plastics Europe: www.plasticseurope.org (2020)
- [11] *Marktverkenning mix kunststoffen en folies.*
TNO-rapport TNO 2017 R10139, maart 2017
- [12] Website RecyBEM
www.recybem.nl
- [13] Busschen, A. ten, Bosman, P., Roetman, E., Lappa, L.
Circulair ontwerpen met hergebruikt composiet
Lectoraatsrapportage, LKT-CE-108157-2112, juni 2023.



[14] Save Plastics – Urban Products
Brochure 2020

[15] Elmpt, A. van
Productie van gerecyclede thermoplast dekplank met gerecyclede thermoharde versterking.
Afstudeerverslag Werktuigbouwkunde Windesheim, juli 2020

[16] Bosman, P.G.F., Schreuder, P.
Doorvaren naar een Circulaire Economie: Verende wrijfstrook
Lectoraatsrapportage LKT-CE-108637-2201, mei 2022

[17] Heun, T. van
Ontwerp van een circulair hybride ligger met autobandkernen.
Afstudeerverslag Werktuigbouwkunde Windesheim, juli 2021

[18] *Dubbeldekkers van de NS krijgen tweede leven.*
Artikel De Ingenieur 2, februari 2020.

[19] Scholtus, M.
The future composition and availability of DKR 350.
Batchelor Thesis Windesheim, juni 2020

[20] De Jong, T.
The Future of Car Tyre Recycling.
Batchelor Thesis Windesheim, juni 2020

[21] Schreuder, P., Hermans, K. Busschen, A. ten
Testen en ontwerpwaarden hergebruikt composiet
Lectoraatsrapportage, LKT-CE-109684-2111, november 2021

Algemene achtergrondinformatie gebruikt bij het project

Van der Vegt, A.K., Govaert, L.E.
Polymeren – Van keten tot kunststof
DUP, 2003, ISBN 90-407-2388-5

CUR Aanbeveling 96: 2017
Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies
Tweede herziene uitgave, CROW 2018, ISBN 978-90-5367-645-5

Nijhof, A.H.J.
Vezelversterkte Kunststoffen – Mechanica en Ontwerp
VSSD, 2004, ISBN 90-407-2484-9

Appendix 1 Projectdeelnemers

Deelnemerslijst RAAK-project hybride hergebruik kunststoffen		
Organisatie	Naam contactpersoon	Mailadres
3D Makers Zone	Herman van Bolhuis	hvb@3dmakerszone.com
	Nick Visser	nv@3dmakerszone.com
Aliancys/ AOC	Menno Claase	Menno.Claase@aliancys.com
Alom	Mark van den Rijen	mark@alom.eu
	Edwin Aerts	edwin@alom.eu
Attero	Berry Bellert	Berry.Bellert@attero.nl
	Thomas van Cann	thomas.van.cann@attero.nl
Biinc	Ben Drogth	info@biinc.nl
Blossom Architecture	Maartje van den Berg	maartje@blossomarchitecture.nl
	Leyla Godoy	leyla@blossomarchitecture.nl
Bootjessloperij 't Harpje	Bram van der Pijll	info@bootjessloperij.nl
Certion	Bart Thiele	b.thiele@certion.nu
Compofloor	Cas Blokker	c.blokker@compofloor.nl
	Earl Kemp	e.kemp@compofloor.nl
Composite Analytica	Sijmon van der Wal	s.van.der.wal@composite-analytica.com
CRC	Corné van Loenhout	c.vanloenhout@greenchemistrycampus.com
	Sylvia Oomen	sylvia.oomen@am-p.nl
	Chris Kamp	chris.kamp@am-p.nl
CT Platon	Dennis Stuy	support@ctplaton.nl
DK Polyester	Serge Knook	serge@dkpolyester.nl
	Igor	igor@dkpolyester.nl
	Pascal	pascal@dkpolyester.nl
EuCIA	Jaap van der Woude	j.vdwoude@home.nl
Fatol	Wim Brink	brink@compositesnl.nl
Fiby Products	Derk-Jan Weeke	derkjanweeke@mfemmen.nl
FRT Tapes BV	Helen Beekman	Helen.beekman@frrttapes.com
	Peter Mathijssen	peter.mathijssen@frrttapes.com
Future Pipe Industries	Han Leurink	H.Leurink@futurepipe.com
Groningen Seaports	Henk Blaauw	H.Blaauw@groningen-seaports.com
	Geert-Jan van Woggelum	G.VanWoggelum@groningen-seaports.com
HHNK	Charlotte Casey-Haden	C.Casey-haden@hhnk.nl
In-Garden	Jan Schulp	jan.schulp@in-garden.nl
Lantor	Edze Visscher	evisscher@lantor.com
	Ward Steijn	wsteijn@lantor.com
Lapinta beheer	Hans te Siepe	hans@tesiepe.eu
MLS Management	Marie-Louise vd Sande	mlsmanagement@kpnmail.nl
NHL Stenden Hogeschool	Jan Jager	Jan.Jager@nhl.nl
NJI	Gerwin Klok	klok@metaalunie.nl
NRK	Martin van Dord	vandord@nrk.nl



Deelnemerslijst RAAK-project hybride hergebruik kunststoffen (vervolg)		
NS	Ilse de Vos van Eekeren	ilse.devosvaneekeren@ns.nl
	Remco de Wilde	remco.dewilde@ns.nl
Odolphi Technical Support	Rients Odolphi	rients@odolphi.com
ORA	Pieter van Ballegooien	pvb@ora.be
PBS Machinery	Peter-Bas Schelling	Peter-bas@pbsmachinery.com
Polem	Sjouke Bus	SBus@polem.nl
	Sytse van der Meulen	svandermeulen@polem.nl
Poly Products	Jan Schrama	Schrama@polyproducts.nl
	Michiel de Bruijker	debruijcker@polyproducts.nl
Polytec Group	Frits Raats	frits.raats@polytec-group.com
	Django Ornek	Django.Ornek@polytec-group.com
ProRail	Eva Dijkema/ Katja Nelissen	Eva.Dijkema@prorail.nl / Katja.Nelissen@prorail.nl
	Edwin Gelinck	edwin.gelinck@prorail.nl
Provincie Flevoland	Mark Spetter	Mark.Spetter@flevoland.nl
Provincie Groningen	Jan Hiddingh	j.hiddingh@provinciegroningen.nl
RailPro	Joost van der Horst	Joost.van.der.Horst@railpro.nl
RecyBEM	Alex van Gelderen	vangelderen@recybem.nl
Reimert Bouw & Infra	Bas Reimert	htbreimert@reimert-almere.nl
Romar Voss	Frank Gielen	FGielen@romar-voss.nl
	Frank Hoogers	fhoogers@romar-voss.nl
Royal Haskoning DHV	Liesbeth Tromp	liesbeth.tromp@rhdhv.com
RWS	Klaas van der Sterren	KLAAS.VANDER.STERREN@rws.nl
Save Plastics	Bram Peters	info@saveplastics.nl
Sekisui Alveo	Remco Willemse	Remco.Willemse@SekisuiAlveo.com
	Huub Creuwels	Huub.Creuwels@sgs.com
SGS	Ron Leppers	Ron.Leppers@sgs.com
Spagnum	Nick van der Griendt	navdgriendt@sphagnum.nl
Strukton	Ton Evers	t-evers@live.nl
Synerco Communicatie	Maarten Barckhof	maarten@circulairbouwen.org
TU Delft - Circular Product Design	Prof. Ruud Balkenende	a.r.balkenende@tudelft.nl
	Jelle Joustra	J.J.Joustra@tudelft.nl
	B. van der Grinten	B.vandergrinten@tudelft.nl
Utwente	Wilma Dierkes	w.k.dierkes@utwente.nl
Waterschap Zuiderzeeland	Joost Schrande	j.schrander@zuiderzeeland.nl
Welex	Emiel Koolmees	e.koolmees@welex.nl

Appendix 2 Bijeenkomsten, interviews, presentaties, paneldiscussies, media

De genoemde bijeenkomsten, interviews, presentaties, paneldiscussies en media-uitingen vonden plaats gedurende de looptijd van het project (1 oktober 2019 tot 1 april 2022).

Bijeenkomsten, georganiseerd vanuit het project

7 oktober 2019

Startbijeenkomst van het project

Windesheim, Zwolle

12 november 2019

Werkpakketleidersoverleg

Windesheim, Zwolle

16 december 2019

Werkpakketleidersoverleg

Windesheim, Zwolle

7 januari 2020

Stuurgroep-bijeenkomst

Windesheim Flevoland, Almere

27 januari 2020

Bespreking over LCC en LCA t.b.v. WP5

Hotel Van der Valk, Spier

4 februari 2020

Werkbijeenkomst voor werkpakketten WP1, WP2 en WP5

Poly Products, Werkendam

10 februari 2020

Werkbijeenkomst voor werkpakketten WP3 en WP4

NS, Utrecht

22 juni 2020

Werkpakketleidersoverleg

On-line via TEAMS

5 oktober 2020

Projectbijeenkomst na 1 jaar

Omni Sport, Apeldoorn

21 oktober 2020

Stuurgroepbijeenkomst

Online via TEAMS

10 februari 2021

Bespreking over LCC en LCA t.b.v. WP5

Online via TEAMS



20 april 2021
Bespreking over LCC en LCA t.b.v. WP5
Online via TEAMS

12 mei 2021
Stuurgroepbijeenkomst
Online via TEAMS

3 februari 2022
Webinar ter afsluiting van het project
Georganiseerd vanuit 'studio Zwolle' bij Windesheim
Online via TEAMS

Interviews en uitnodigingen voor een gesprek

12 november 2019
Interview door BNR Radio
Bij Certion in Lelystad

18 november 2019
Interview door Trouw
Bij Windesheim in Zwolle

20 november 2019
Interview door AD
Bij Windesheim in Zwolle

15 maart 2021
Gesprek met Philip Easthill, European Boating Industry
Over ontwikkelen European Roadmap End-of-life Boats 2022
Online via TEAMS

14 april 2021
Gesprek met Marjon van Diepen, cursist opleiding sustainable business development
Over de industrialisatie van het hergebruik van composieten
Online via TEAMS

3 mei 2021
Gesprek met Sjaak Haakman, ReSail
Over hergebruik van rompen en zeilen van oude polyesterboten
Online via TEAMS

Presentaties op uitnodiging

9 december 2019
Industrial re-use of composites
M2i Conference, Noordwijkerhout, 9 december 2019

1 februari 2021
Webinar hergebruik composieten
Online voor NHN-groep Noord-Holland



14 juni 2021

Webinar End of Life Boats (EoB), georganiseerd door European Boating Industry
Presentatie 'Structural re-use of composites'

14 september 2021

Online bijeenkomst t.b.v. RAAK-Award aan SiA.
Presentatie 'Hybride hergebruik kunststoffen.'

6 oktober 2021

Webinar Sustainability of Composites van CompositesNL
Presentatie 'Structural re-use of composites'

3 november 2021

Open dag KATC, Bergen op Zoom
Presentatie 'Oplossingen voor EoL thermoharde composieten. Recycling en circulariteit.'

Paneldiscussies op uitnodiging

21 november 2019

End-of-Life Boats

Panel-discussie met deelname van de projectleider tijdens de Metstrade
RAI, Amsterdam (zie foto)



5 februari 2021

'Afval bestaat niet'

Panel-discussie met deelname van de projectleider tijdens de Week van de circulaire economie.
Online

26 april 2021

Brainstorm georganiseerd door Offshore Wind Innovation Center (OWIC)
Over oplossingen voor het probleem van oude rotorbladen van windmolens
Online via TEAMS

14 juni 2021

End-of-life Boats

Online seminar en panel discussie georganiseerd door European Boating Industry

Artikelen in kranten en tijdschriften waarin het onderzoek van Windesheim wordt genoemd

15 november 2019

Afgedankte molenwiek leeft voort
Artikel in De Stentor

20 november 2019

Afgedankte windmolenwieken krijgen een tweede leven
Artikel in het AD (zie foto)



Februari 2020

'Dubbeldekkers van NS krijgen tweede leven.'

In dit artikel wordt de samenwerking in het RAAK-project van Windesheim genoemd en het voornemen om met ProRail en Windesheim een dwarsligger van hergebruikt composiet te ontwikkelen.

Artikel in De Ingenieur 2, Februari 2020

Mei 2020

Composiet: sterk in de lengte

Artikel in Recycling Magazine, mei 2020

Mei 2020

Meer winst uit hergebruik

Artikel in Milieumagazine, Nr. 3, mei 2020

Mei 2020

Industrial re-use of composites

Reinforced Plastics, Volume 64, No. 3, May/June 2020

Februari 2021

Recycling end-of-life composite parts: New methods, markets.

Composite World, news item, februari 2021

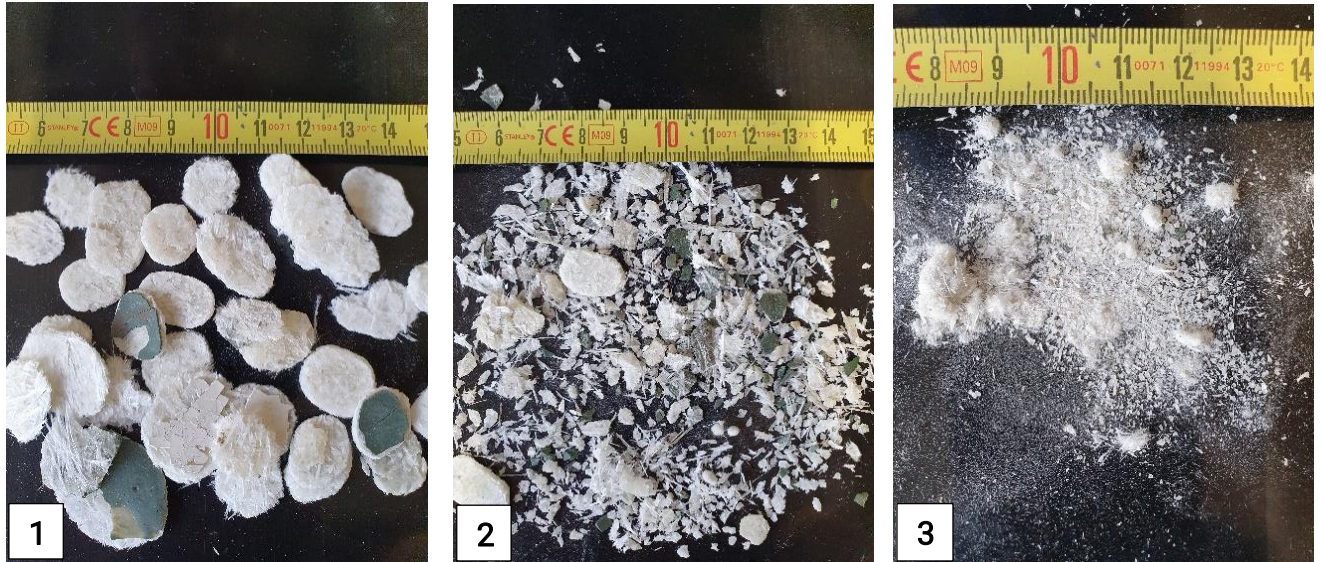


Appendix 3 Onderzoeks-memoranda

Classificatie vlokkenfractie CRC

Memo

Van CRC zijn een aantal fracties verkregen. In het verkleiningsproces dat zij gebruiken kunnen ze sturen op de grootte van de vlokken. Een deel van een zoutschot is door hen verkleind tot drie verschillende fracties. Het zoutschot is geproduceerd middels handlamineren en bestaat voornamelijk uit willekeurig georiënteerde glasmat-versterking in polyester. In de fracties is dit waar te nemen door de aanwezigheid van veelal plaatvormige vlokken.



Op foto 1 is de grootste fractie te zien. Dit zijn plaatvormige stukken. Op foto 2 is een kleine zeeffractie te zien die voor het overgrote deel uit plaatvormige stukken bestaat, maar deze zijn aanzienlijk kleiner dan de vlokken uit fractie 1. Foto 3 laat de kleinste zeeffractie zien met een deel kleine plaatvormige stukken en een deel pluizige vezelbolletjes.



De vierde fractie die van CRC verkregen is, bestaat uit verkleinde glasvezelversterkte epoxy (GRE) buizen. Deze buizen zijn geproduceerd met een wikkeltechniek. Hiermee worden in hars gedrenkte rovings om een ronde mal gewikkeld. De buizen hebben hierdoor een hoge vezel oriëntatie en een hoog vezelgehalte. Bij deze fractie hebben de vlokken een langwerpige vorm, zie foto 4.

De vijfde fractie is gemaakt van verkleinde interieurpanelen van treinstellen van de NS, zie foto 5.

Deze verschillende fracties zijn samen met de zoutschotfracties onderzocht op vocht- en harsgehalte.

Vochtpercentage

Van de diverse fracties is drie keer 200 gram materiaal afgewogen en 1 uur in een oven van 110°C geplaatst om het vochtgehalte te bepalen.

	Meting 1	Meting 2	Meting 3	Gem. vocht%
Zoutschot fractie 1	1,12%	1,34%	1,40%	1,3%
Zoutschot fractie 2	1,57%	2,06%	2,02%	1,9%
Zoutschot fractie 3	1,51%	1,89%	1,87%	1,8%
CRC GRE	0,46%	0,49%	0,58%	0,5%
CRC NS	1,07%	0,95%	1,05%	1,0%

Het vochtgehalte van de zoutschotfracties is met gemiddeld 1,7% het hoogst van de gemeten fractie.

Omdat deze zoutschotten 48 jaar onder water zijn toegepast is het niet verwonderlijk dat het vochtgehalte iets hoger ligt.

Het vochtgehalte van de GRE fractie ligt op ongeveer 0,5%. Het vochtgehalte van de NS-fractie ligt op ongeveer 1%.

Vezelpercentage

Voor het bepalen van het vezelpercentage is ongeveer 5 gram materiaal afgewogen en 1 uur in een oven van 625°C geplaatst. Hierna worden de gewichtspercentages vezel en hars bepaald.

	Meting 1	Meting 2	Meting 3	Gem. vezel (%)	Gem. hars (%)
Zoutschot fractie 1	31,0%	29,4%	35,6%	32%	68%
Zoutschot fractie 2	22,7%	19,8%	20,5%	21%	79%
Zoutschot fractie 3	27,4%	31,7%	29,9%	30%	70%
CRC GRE	70,1%	65,1%	67,5%	68%	32%
CRC NS	54,4%	55,0%	55,0%	55%	45%

Met deze proef wordt het onbrandbare deel van het composiet bepaald. Het brandbare deel is de hars. Het onbrandbare deel wat overblijft bestaat voornamelijk uit glasvezels, maar kan ook vulstoffen zoals bijvoorbeeld krijt bevatten.

Het harsgehalte van de zoutschotfracties is aanzienlijk hoger dan bij de GRE fractie. Het zoutschot is geproduceerd middels handlamineren. Bij handlamineren zijn harspercentages van 70% niet ongewoon. Fractie 2 heeft een aanzienlijk hoger harsgehalte. Dit zou kunnen komen door de harsrijke buitenste laag (groene gelcoat) die op het oog meer aanwezig is in fractie 2 dan in de andere twee fracties.

De GRE fractie heeft een harspercentage van ongeveer 30%, en een vezelpercentage van ongeveer 70%. GRE buizen worden gemaakt met een wikkeltechniek met hoog georiënteerde vezels. Vezelpercentages tot 70% zijn dan mogelijk. De NS-fractie heeft een harspercentage van ongeveer 45%. De overige 55% bestaat uit glasvezels en hulp- en vulstoffen voor bijvoorbeeld brandvertraging.

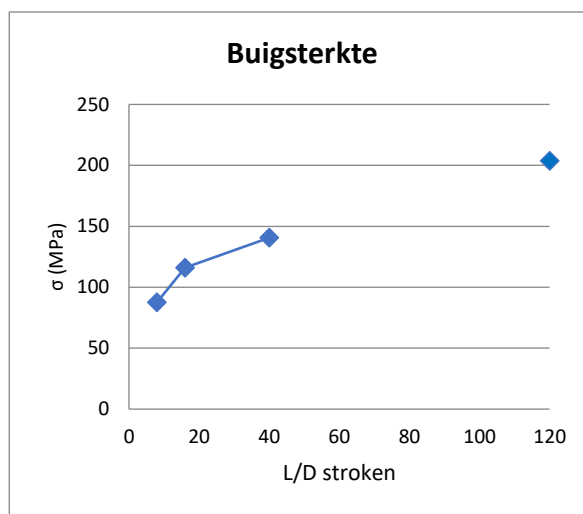
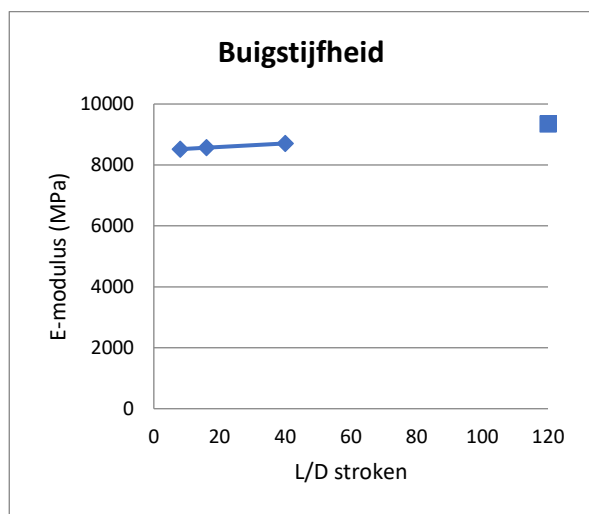
Om de eigenschappen van de vlokken zo optimaal mogelijk te kunnen inzetten is de vorm van de vlokken in het nieuwe composiet van groot belang. Bij nieuwe producten geproduceerd met bijvoorbeeld pultrusie of vacuüm-injectie zijn veelal lange doorlopende vezels toegepast (continue-versterking). Met hergebruikt composiet is dit niet zo. Dit is opgebouwd uit allemaal kleine vlokjes (discontinu-versterking).

Een verschil met een continue (oneindig lange) versterking is dat naast de eigenschappen van de versterking zelf ook de (gemiddelde) lengte van die versterking van invloed is op de composieteigenschappen.

Een belangrijke parameter hierin is de L/D-verhouding. Dit is de verhouding tussen de lengte en de dikte van de versterking. In het algemeen geldt dat hoe groter deze verhouding, hoe beter de sterkte-eigenschappen van het composiet.

In een eerder uitgevoerd onderzoek door het Lectoraat Kunststoftechnologie is gebleken dat deze L/D verhouding grote invloed heeft op de sterkte¹.

In dit onderzoek samples gemaakt met vier lagen rechthoekige stroken. Per sample varieerde de lengte van deze stroken. Zoals te zien in de onderstaande grafieken blijkt dat de L/D-verhouding van deze stroken nauwelijks van invloed is op de stijfheid. Voor de sterkte daarentegen geldt dat bij toenemende L/D-verhouding de sterkte ook toeneemt. Het laatste losse punt op de beide grafieken geeft een L/D-verhouding van oneindig weer. De stroken waren in dit geval gelijk aan de lengte van het sample.



Met de vlokken van de beschreven fracties zijn plaatjes gegoten, zie foto 6, waaruit vervolgens buigstaven gezaagd zijn. Deze buigstaven zijn getest op 3-puntsbuiging. De eigenschappen staan hieronder weergegeven. Van de zoutschotfracties is alleen van fractie 2 een sample gemaakt.

Op een glasplaat is een malletje gemaakt van ongeveer 200x200mm met een hoogte van 5mm. Deze ruimte is gevuld met vlokken van de afzonderlijke fracties. Vervolgens is dit afgegoten met een epoxyhars (EP). (Cytex Epoxyhars L + harder GL1)

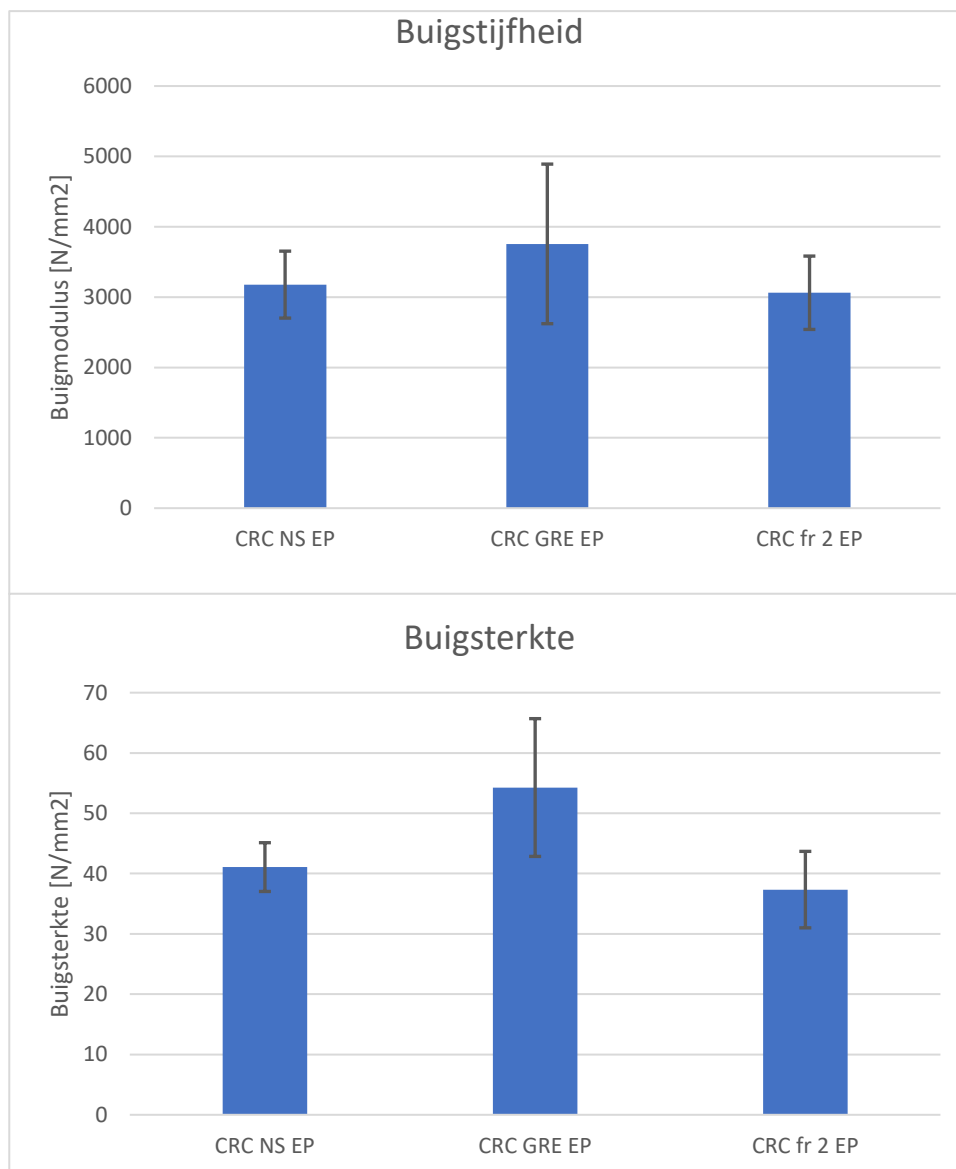
Uit de afgegoten panelen zijn zeven buigstaafjes van (lxbxh) 100x20x5mm gezaagd. Deze zijn vervolgens getest met een oplegafstand van 80mm en een snelheid van 1mm/min. De resultaten zijn weergegeven in de onderstaande twee grafieken. De getoonde waarden zijn een gemiddelde van de zeven samples. De foutbalken geven één keer de standaardafwijking naar onder en één keer de standaardafwijking naar boven weer.

De onderstaande tabel toont de hoeveelheid vlokken en hars die voor de gegoten plaatjes gebruikt is, de gemiddelde stijfheid, sterkte en het onbrandbare deel (glasvezels) van de gebruikte fractie.



¹ P. Schreuder; K. Hermans; A. ten Busschen; Hergebruik van thermohardende composieten: prestaties bij hergebruik in de vorm van stroken, 2017, rapportnummer: LKT-RE-106030-1701

	Vlokken		Hars		Buigmodulus [MPa]	Buigsterkte [MPa]	Vezel in vlokken [%]	Vezel in sample [%]
	[gr]	[%]	[gr]	[%]				
CRC GRE EP	100,0	30	232,3	70	3756	54	68	20
CRC fr2 EP	98,5	32	212,6	68	3062	37	21	7
CRC NS EP	62,7	18	276,8	82	3178	41	55	10



Zowel de CRC NS als de CRC GRE hebben ongeveer 30% gew. vlokken in de plaatjes. Het vezelpercentage in deze vlokken is echter heel verschillend. De GRE-fractie bestaat 70% uit glasvezels en bij de zoutschotfracties bevatten de vlokken slechts 20% glasvezels. In de laatste kolom van de tabel staan het vezelpercentage in het sample weergegeven. Voor de NS-fractie en de zoutschotfractie-2 zijn die resp. 10% en 7%. De GRE-fractie heeft een vezelpercentage van 20%. In de resultaten is dit ook terug te zien. De NS-fractie en de zoutschotfractie-2 hebben redelijk vergelijkbare eigenschappen. De GRE-fractie heeft een hogere sterkte en stijfheid.

De gebruikte epoxyhars is Germanische Loyds gecertificeerd. Volgens de specificaties is de eis dat de trekstijfheid van deze hars hoger moet liggen dan 2.700 MPa. De datasheet geeft een testwaarde van 3.490 MPa. Voor dit onderzoek zijn de samples getest op buiging. De buigstijfheid ligt veelal iets lager dan de trekstijfheid. Bij de NS-fractie en de zoutschotfractie ligt de buigstijfheid iets lager dan de genoemde trekstijfheid in de datasheet. De vezels voegen in dit geval dus weinig toe aan de stijfheid. Bij de GRE fractie ligt de gemiddelde stijfheid iets hoger. De vlokken voegen dus iets toe aan de eigenschappen, al geven deze samples ook een grote spreiding. In dit onderzoek hebben alle samples dezelfde afmetingen, ongeacht de grootte van de vlokken. Op de foto's is te zien dat de vlokken uit de GRE-fractie groter zijn dan bij de andere fracties. Door het kiezen van andere proefstukafmetingen, bijvoorbeeld dikkere samples, ontstaan er meer gestapelde en overlappende vlokken door de dikte. Lokale varianties worden zo verminderd en daardoor worden uniformere eigenschappen (minder spreiding) verwacht.



Van Second Life Composites (SLC) zijn een drietal fracties verkleinde composiet verkregen. De verkleinde fracties hebben elk een ander ingangsmateriaal: pultrusieafval, SMC geperste delen en een turbineblad. Deze fracties zijn geanalyseerd op vocht- en vezelgehalte. Ook zijn de fracties middels een zeefproef tot drie zeeffracties gezeefd en verder onderzocht op verwerking in nieuw composietmateriaal.

Vochtpercentage

Voor het bepalen van het vochtpercentage is 200 gram materiaal afgewogen. Na 1 uur op 110°C is het materiaal nogmaals gewogen. Het verschil in gewicht is gelijk aan het deel vocht wat verdampt is. Van elke fractie zijn drie metingen gedaan. De resultaten staan in de onderstaande tabel:

	Meting 1	Meting 2	Meting 3	Gem. vocht %
SLC Pultrusie	0,45%	0,60%	0,53%	0,5%
SLC SMC	0,59%	0,70%	0,69%	0,7%
SLC Turbineblad	0,80%	0,85%	0,71%	0,8%

De pultrusiefractie heeft het laagste vochtpercentage, gevolgd door de SMC-fractie met 0,7%. De turbinebladfractie heeft het hoogste vochtpercentage met 0,8%. De onderlinge verschillen zijn erg klein. Een vochtpercentage kleiner dan 1% is laag genoeg om verder te verwerken in composiet zonder eerst te drogen.

Vezelgehalte

Voor het bepalen van het vezelgehalte is een afbrandproef gedaan. Daarvoor is ongeveer 5 gram materiaal afgewogen in een porseleinen kroes die vervolgens in een oven op 625°C is geplaatst. Na 1 uur blijft een onbrandbare fractie over, deze is nogmaals gewogen. Hieruit worden de gewichtspercentages vezel en hars bepaald. Van elke fractie zijn drie metingen gedaan. De resultaten staan in onderstaande tabel:

	Meting 1	Meting 2	Meting 3	Gem. vezel %	Gem. hars %
SLC Pultrusie	69,7%	70,0%	69,9%	70%	30%
SLC SMC	55,7%	55,2%	55,3%	55%	45%
SLC Turbineblad	67,7%	68,5%	68,3%	68%	32%

De vezelpercentages van de fracties liggen in lijn met de verwachting. Met pultrusie en vacuüm-injectie (turbineblad) zijn vezelpercentages van 70% niet ongewoon. Bij SMC worden korte vezels (+/- 50 mm) toegepast, die willekeurig georiënteerd zijn. Daardoor zijn de vezelgehaltes lager dan bij pultrusie en het turbineblad. Opgemerkt moet worden dat het restant van de SMC-fractie na afbranden niet alleen uit glasvezels bestaat maar ook vulstof. Het werkelijke glasvezelgehalte van de SMC-fractie zal dus lager zijn dan 55 gew. %.

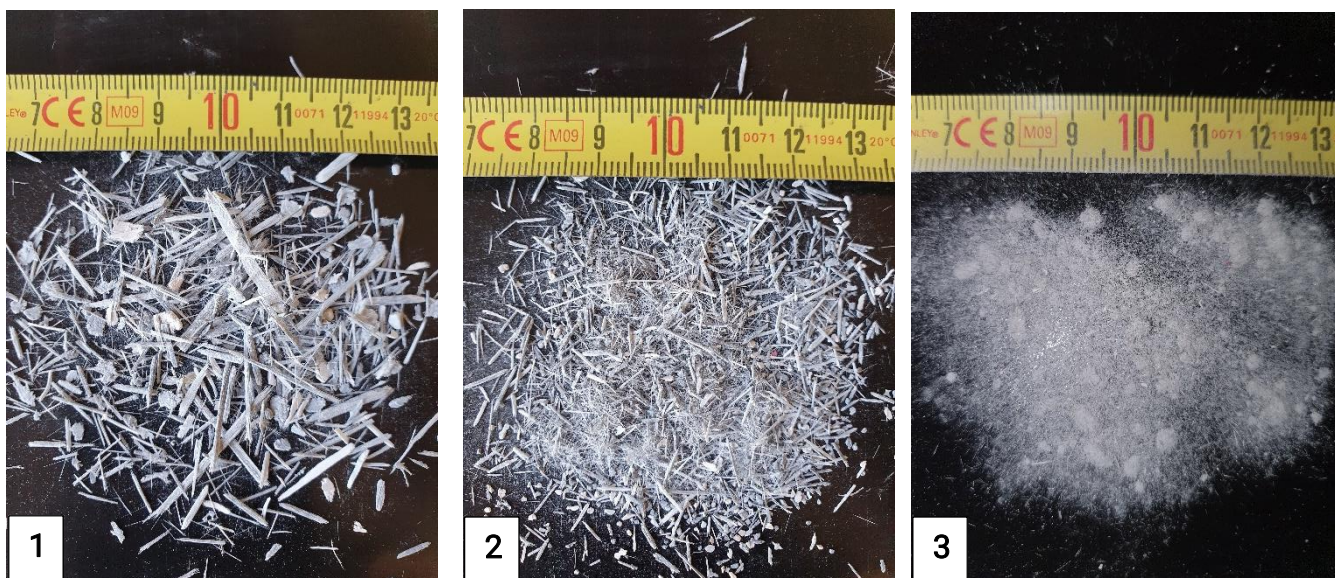
Zeeffracties

De drie SLC fracties zijn gezeefd in drie nieuwe fracties, dit leverde negen fracties op. 1 kg fractie is gezeefd op een zeef met maasgrootte 1 mm en een zeef met 0,5 mm maasgrootte. De fractie die door de zeef met maasgrootte 0,5 mm valt is geclassificeerd als 'stof'. De afzonderlijke fracties zijn gewogen en de resultaten staan in onderstaande tabel.

	> 1 mm	> 0,5 – < 1 mm	< 0,5 mm
SLC Pultrusie	10%	7%	83%
SLC SMC	11%	13%	76%
SLC Turbineblad	22%	14%	64%

Het overgrote deel van deze fracties is kleiner dan 0,5 mm. Tussen de fracties zitten nog wel een opmerkelijke verschil. Zo heeft de turbineblad-fractie tweemaal zo veel >1 mm-fractie dan beide andere fracties. De hierna getoonde foto's tonen de verschillen tussen de gezeefde fracties.

Pultrusie



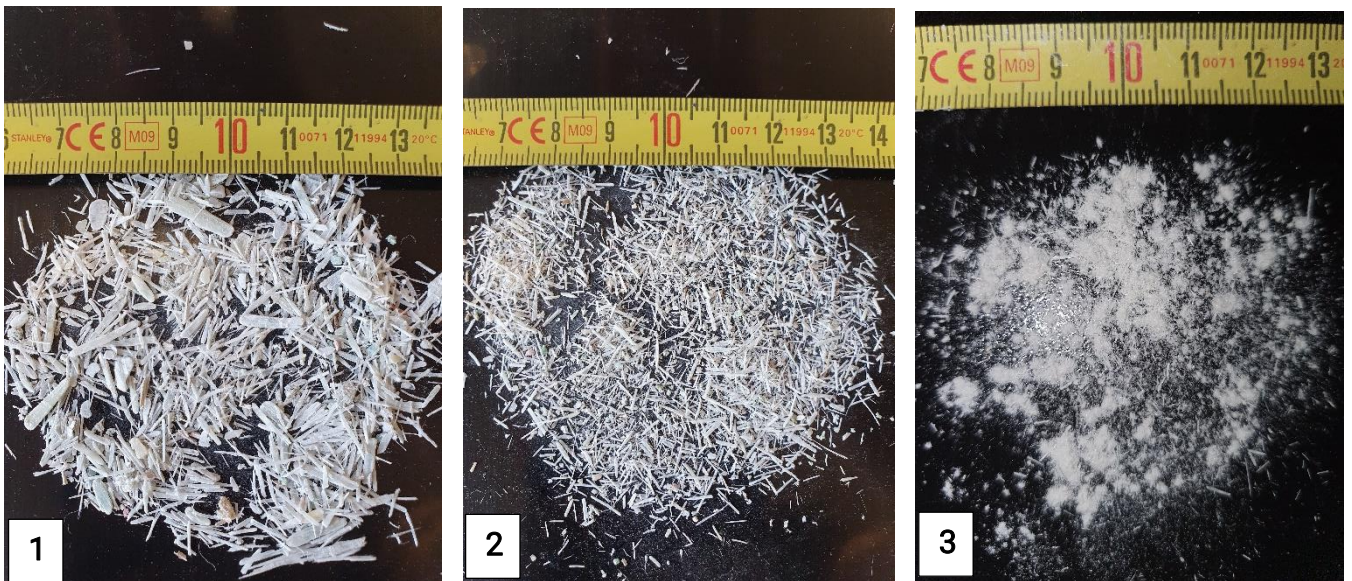
Op foto 1 is de zeeffractie te zien die achterbleef op de 1 mm zeef. Dit zijn voornamelijk langwerpige sprietjes met een klein deel plaatvormige stukjes. Op foto 2 is de zeeffractie te zien die achterbleef op de 0,5 mm zeef. Ook hier zijn het weer voornamelijk langwerpige sprietjes, maar in dit geval korter en dunner dan de andere zeeffractie. Foto 3 geeft de fractie weer die door de 0,5 mm zeef gevallen is. Dit is voornamelijk stof.

SMC



Op foto 1 is de zeeffractie te zien die achterbleef op de 1 mm zeef. Dit zijn voornamelijk kleine plaatvormige stukken met een klein deel langwerpige sprietjes. Op foto 2 is de zeeffractie te zien die achterbleef op de 0,5 mm zeef. Ook hier zijn het weer voornamelijk plaatvormige stukken met bolletjes gevormd door kleine losse vezels. Foto 3 geeft de fractie weer die door de 0,5 mm zeef gevallen is. Dit is voornamelijk stof.

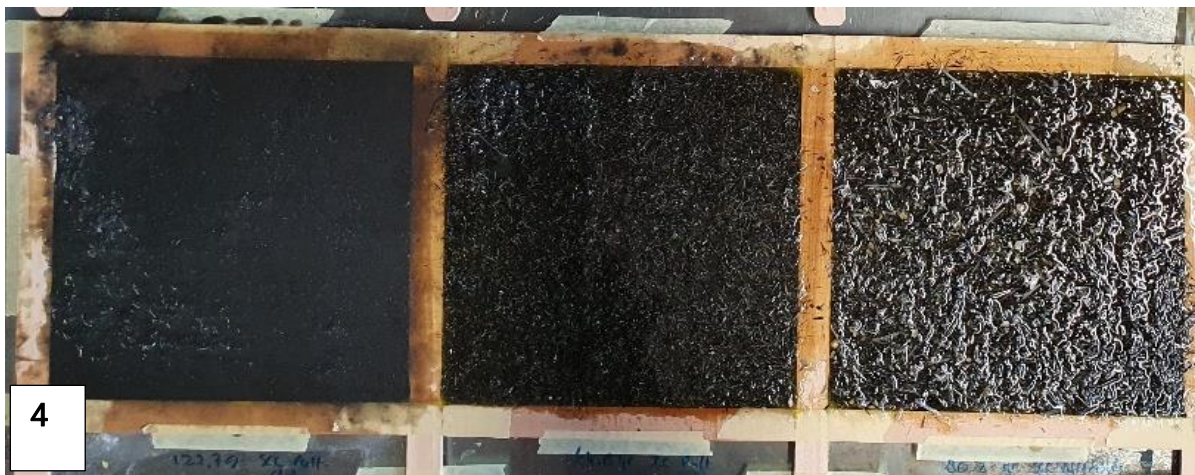
Turbineblad



Op foto 1 is de zeeffractie te zien die achterbleef op de 1 mm zeef. Dit zijn voornamelijk langwerpige sprietjes. Op foto 2 is de zeeffractie te zien die achterbleef op de 0,5 mm zeef. Ook hier zijn het weer voornamelijk langwerpige sprietjes, maar in dit geval korter en dunner dan de andere zeeffractie.

Bij producten met een hoge volumefractie georiënteerde vezels, zoals bij pultrusie en turbinebladen, ontstaan bij het shredderen vooral langwerpige sprietjes. Bij willekeurig georiënteerde vezels (SMC) ontstaan meer plaatvormige stukken.

De verschillende (gezeefde) fracties zijn gebruikt om plaatjes mee te maken. Hiervoor is een malletje gemaakt waar vervolgens vlokken van de afzonderlijke fracties in zijn gestrooid. Vervolgens is dit afgegoten met een onverzadigde polyesterhars (UPR, Synolite 1967-G-5) of een epoxyhars (EP, Cytox Epoxyhars L + Harder GL1). De plaatjes zijn ongeveer 200x200 mm en zijn 5 mm dik. Op foto 4 zijn drie verschillende platen te zien. Uit deze platen zijn zeven buigsamples gezaagd van (lxbxh) 100x20x5 mm. De samples zijn getest door middel van een driepuntsbuigproef met een overspanning van 80 mm en een testsnelheid van 1 mm/min.



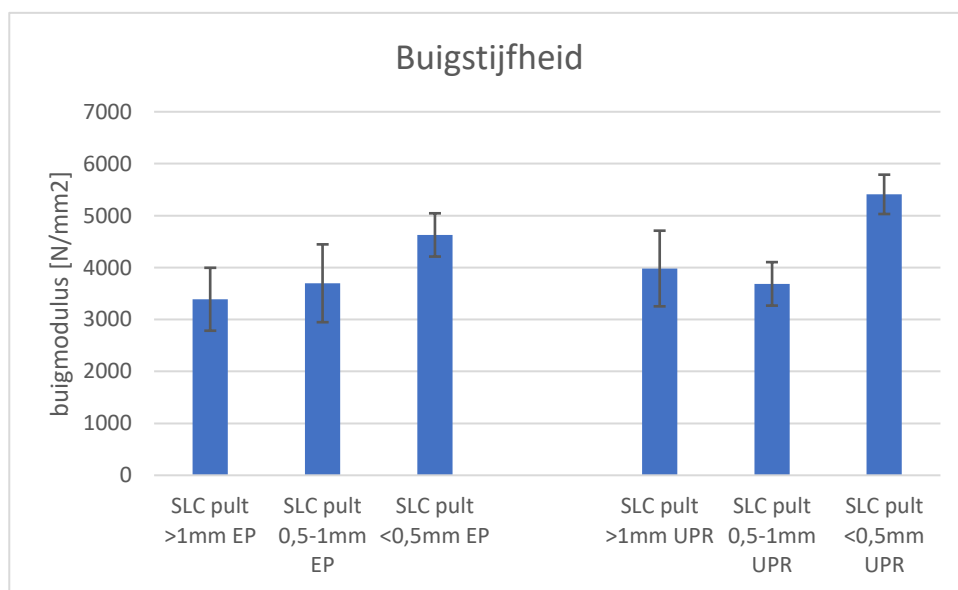
In totaal zijn acht verschillende platen gemaakt. In de onderstaande tabel zijn de verschillende platen weergegeven met de bijbehorende hoeveelheden vlokken en hars. Verder toont de tabel de gemiddelde stijfheid, sterkte, het vezelpercentage in de vlokken en het berekende vezelpercentage van de zeven geteste samples. Voor de vezelpercentages van de gezeefde fracties zijn de vezelpercentage van de gehele batch gebruikt. Van elke zeeffractie is één sample verast om het vezelpercentage van de zeeffractie te bepalen, deze waren gelijk aan het percentage van de gehele fractie.

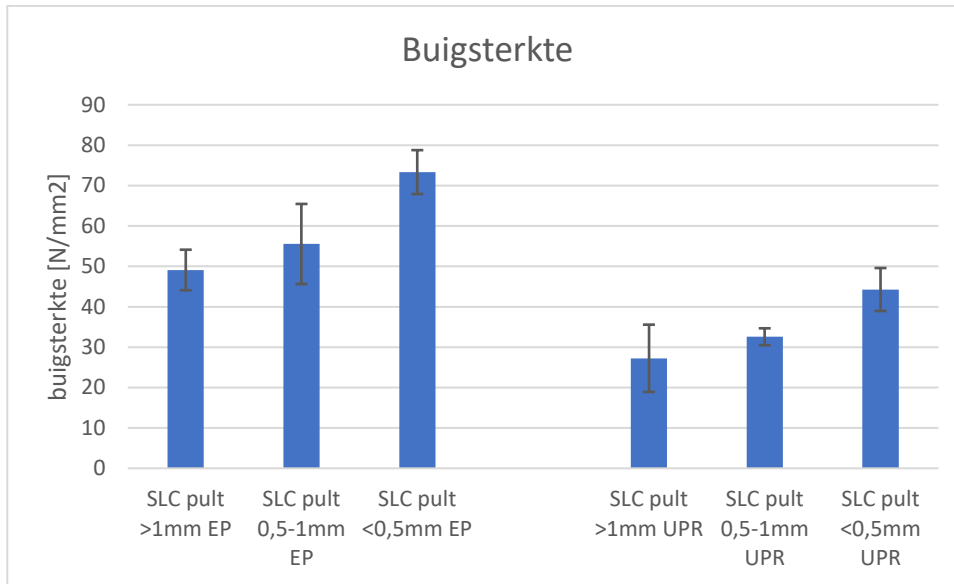
	Vlokken		Hars		Buigmodulus [MPa]	Buigsterkte [MPa]	Vezel in vlokken [%]	Vezel in sample [%]
	[gr]	[%]	[gr]	[%]				
SLC Pult >1mm UPR	80,2	25	239,0	75	3982	27	70	18
SLC Pult 0,5-1mm UPR	64,8	21	238,4	79	3686	33	70	15
SLC Pult <0,5mm UPR	122,7	41	177,3	59	5410	44	70	29
SLC Pult >1mm EP	69,3	22	246,5	78	3390	49	70	15
SLC Pult 0,5-1mm EP	53,5	17	265,1	83	3697	56	70	12
SLC Pult <0,5mm EP	130	40	191,2	60	4628	73	70	28
SLC Turb >1mm EP	102,9	34	200,3	66	4299	56	68	23
SLC SMC >1mm EP	74,7	23	252,5	77	3028	42	55	13

Van de pultrusie-fractie is een vergelijking gemaakt tussen de polyester en epoxyhars. Verder zijn de pultrusie-, turbineblad- en SMC-fracties onderling vergeleken. Voor dit vergelijk is alleen gebruik gemaakt van de grootste zeeffractie, de >1 mm fractie.

Het percentage vlokken bij de SLC pult <0,5 mm, zowel de UPR als de EP-variant, ligt aanzienlijk hoger dan bij de overige samples. Omdat deze kleinste zeeffractie vooral uit stof bestaat, is het mogelijk om een dichte pakking te krijgen ten opzichte van de grove fracties met meer holle ruimtes.

In de grafiek hieronder staan de gemeten stijfheid en sterkte weergegeven, met daarbij aangegeven de standaardafwijking. In deze grafieken is van de drie zeeffracties van SLC pultrusie materiaal de epoxy en de polyester variant weergegeven.

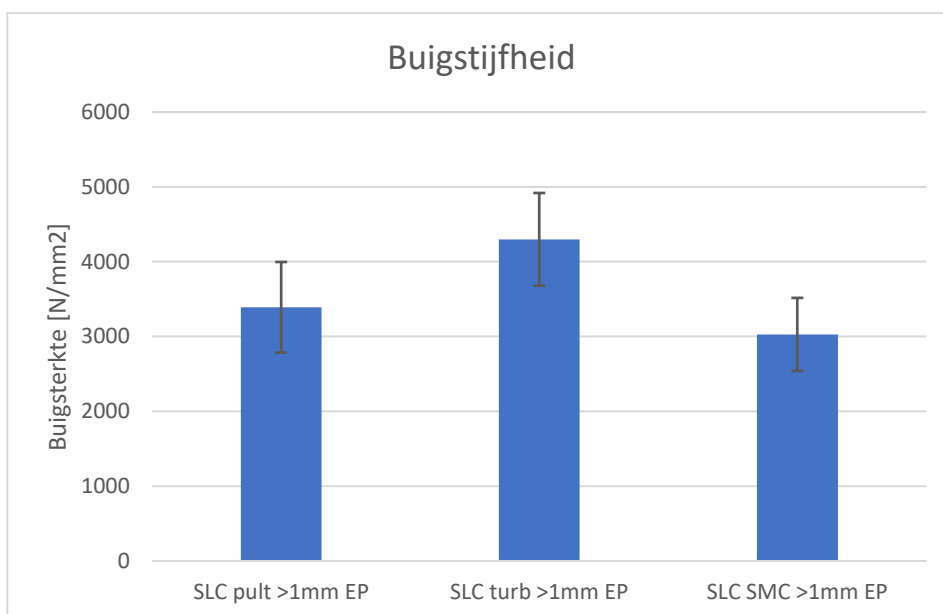


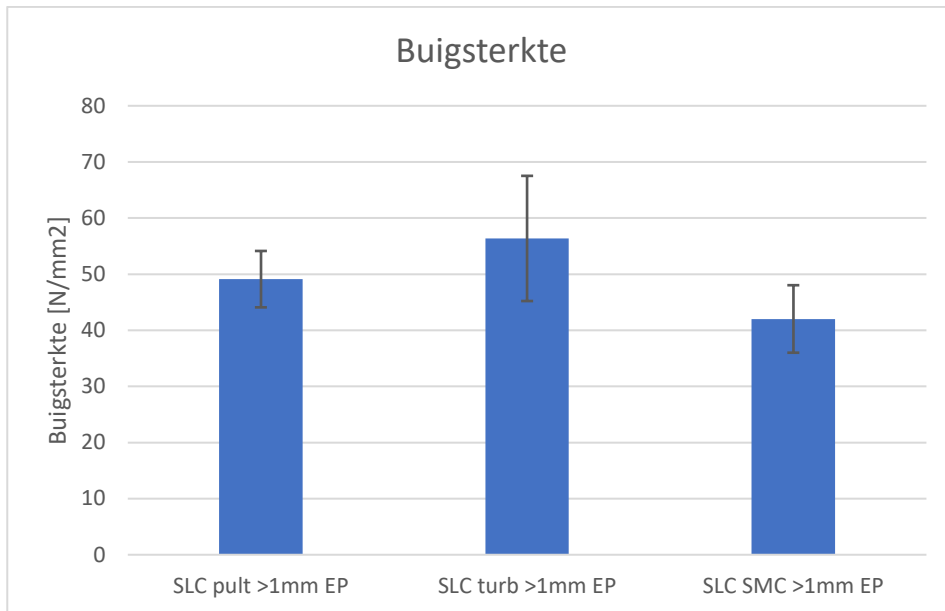


Bij de epoxy-variant neemt de stijfheid toe naarmate de zeeffractie kleiner wordt. Bij zowel de epoxy- als de polyestervariant geeft de kleinste zeeffractie de hoogste stijfheid. Dit is te verklaren doordat het vlokkenpercentage bij de samples met kleinste zeeffractie met ongeveer 40% aanzienlijk hoger ligt dan de 20-25% bij de andere zeeffracties. Het aandeel vezels in de samples met de kleinste fractie is ongeveer 30%.

De EP en UPR samples van de >1 mm en 0,5-1 mm zeeffractie hebben orde grootte dezelfde stijfheid. Door de grote standaardafwijking zijn hier geen significante verschillen te zien. Bij de buigsterkte zijn de epoxysamples aanzienlijk sterker dan de polyester samples. Dit is te verklaren doordat epoxyharsen een betere hechting geven dan een polyesterhars. Bij beide harssoorten is te zien dat bij een kleinere zeeffractie de gemiddelde sterkte hoger is. Ook hier geeft de kleinste zeeffractie de grootste sterkte.

Onderstaande grafieken geven de metingen tussen de verschillende fracties weer. Zowel de stijfheid als de sterkte laten voor de afzonderlijke fracties eenzelfde beeld zien. De wijk-fractie geeft de hoogste stijfheid en sterkte, gevolgd door de pultrusie-fractie. De SMC-fractie geeft de laagste stijfheid en sterkte.





Bij de turbineblad-fractie bestaat het sample voor 34 gew.% uit vlokken en bij de pultrusie- en SMC-fractie resp. 22% en 23%. Omgerekend naar het vezelpercentage in het sample is dit voor de turbinebladfractie 23% en bij de pultrusie- en SMC-fractie resp. 18% en 13%. Bij de SMC-samples liggen de stijfheid en sterkte iets lager dan bij de pultrusie-samples. Hoe hoger het glasvezelgehalte in de samples, hoe beter de mechanische eigenschappen.

Achtergrond

Binnen het RAAK-Hybride project van het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) wordt op dit moment een oplossing onderzocht om de kruip van kunststof profielen van Save Plastics tegen te gaan. Als oplossing is een sleuf gefreesd in het profiel, waarin vervolgens een strook hergebruikt composiet wordt gegoten. Uit de eerste testen blijkt dat het mogelijk is om de kruip sterk te verminderen door er een composiet laag op aan te brengen.

Vanuit FRT-tapes uit Lelystad de vraag gekomen of LKT een oplossing heeft voor resten glas-PP tapes. Na de productie van grote rollen tape worden die rollen op klant specifieke afmeting (breedte) gesneden. De resten kunnen moeilijk worden verkocht en worden nu na een tijdje op voorraad te hebben gehouden, afgevoerd.

Eerste test met glas-PP tapes

Een mogelijkheid waar aan gedacht wordt is het toepassen van resten tapes op de kunststof profielen van Save Plastics om de kruip te verminderen. Daar is een eerste test voor uitgevoerd. Op een kunststof balkje van Save Plastics is een stukje tape gelegd. Vervolgens is er een teflon lossingsfolie op aangebracht en is met behulp van een vlakke warmtebron (5 min, $\pm 200^{\circ}\text{C}$ met $\pm 10\text{kg}$ extra druk) de tape versmolten op het kunststof balkje. Zie de foto's hiernaast: links de voorbereiding (tape met teflonfolie) en rechts het resultaat. Het bleek erg lastig om een goede consolidatie te verkrijgen. De grootste oorzaak lijkt het ruwe oppervlak van het balkje, waardoor de tape niet over het hele oppervlak volledig kan hechten.

Tweede test met glas-PP tapes

Voor de tweede test is een vlakke kant aan het balkje gefreesd. Vervolgens is eerst het balkje voorverwarmd met de vlakke warmtebron ($5\text{ min } \pm 200^{\circ}\text{C}$). Volgens is de tape op dezelfde manier zoals bij de eerste test toegepast. Het resultaat is te zien op de foto. De tape is volledig versmolten met het oppervlak van het balkje. De vervuiling in het balkje (witte en bruine vlekjes) zijn door de tape heen te zien.



Vervolg

De volgende testen richten zich op het toepassen van versneden tapes in de mixed-plastics schuim.

Ing. P. Schreuder, Ing. K. Hermans
Onderzoekers Lectoraat Kunststoftechnologie
Windesheim, 17 december 2020



Appendix 4 Productiegegevens en foto's

Van de gebruikte composiet-grondstoffen zijn de specificaties als volgt:

CSM glasmat	225 g/m2 of 450 g/m2	Chopped Strand glasmat Poedergebonden Type MA 111, Oschatz Glass
CFM glasmat	450 g/m2	Continuous Filament glasmat Type Unifilo M801, OCV
Glasweefsel-tape	300 g/m2	50 mm glasweefsel-tape Merrem & Laporte
UD glaslegsel	900 g/m2 (waarvan 840 g/m2 in 0°)	Glaslegsel, gestikt Selcom Multiaxial Technology
Polyester gelcoat	iso UP-gelcoat Type ISO 3000, BÜFA	+ 10% RAL7035 pigment (lichtgrijs)
Polyester lamineerhars	ortho UP-hars (voorversneld)	Synolite 8388-P1 AOC
Polyester injectiehars (ook gebruikt als giethars)	DCPD UP-hars (voorversneld)	Synolite 1967-G-5 AOC
Harder	MEK-Peroxide	Butanox M50 Nouryon (voorheen: Akzo-Nobel)
Droog zand	1-2 mm of 2-4 mm	Vuurgedroogd zand SIBELCO Filcom

Handlamineren van inlays in profielen van Save Plastics

Locatie: Save Plastics in Arnhem, 8 januari 2020. Temperatuur: ca. 18 °C.

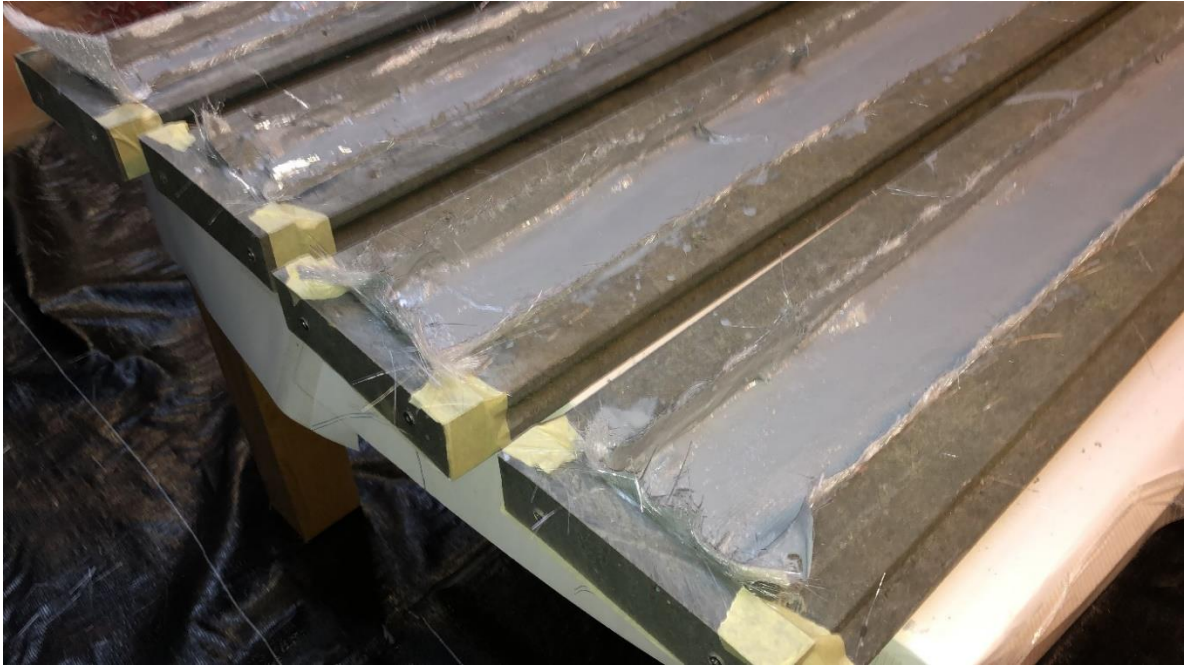
Omdat de gefreesde sponning rechthoekig is (geen ondersnijding) is hechting van de te maken inlay met het PE-gebaseerde profiel van Save Plastics gerealiseerd door in de hoeken van de sponning 4 x 40 RVS schroeven aan te brengen met een kop die ca. 10 mm uitsteekt. Deze schroeven zijn aan elke zijde van de sponning in de hoeken h.o.h. 200 mm aangebracht.

Na inharsen van de sponning met polyesterhars wordt tweemaal CSM-glasmat 450 g/m² met een breedte van 200 mm aangebracht. De schroefkoppen steken door deze laag.

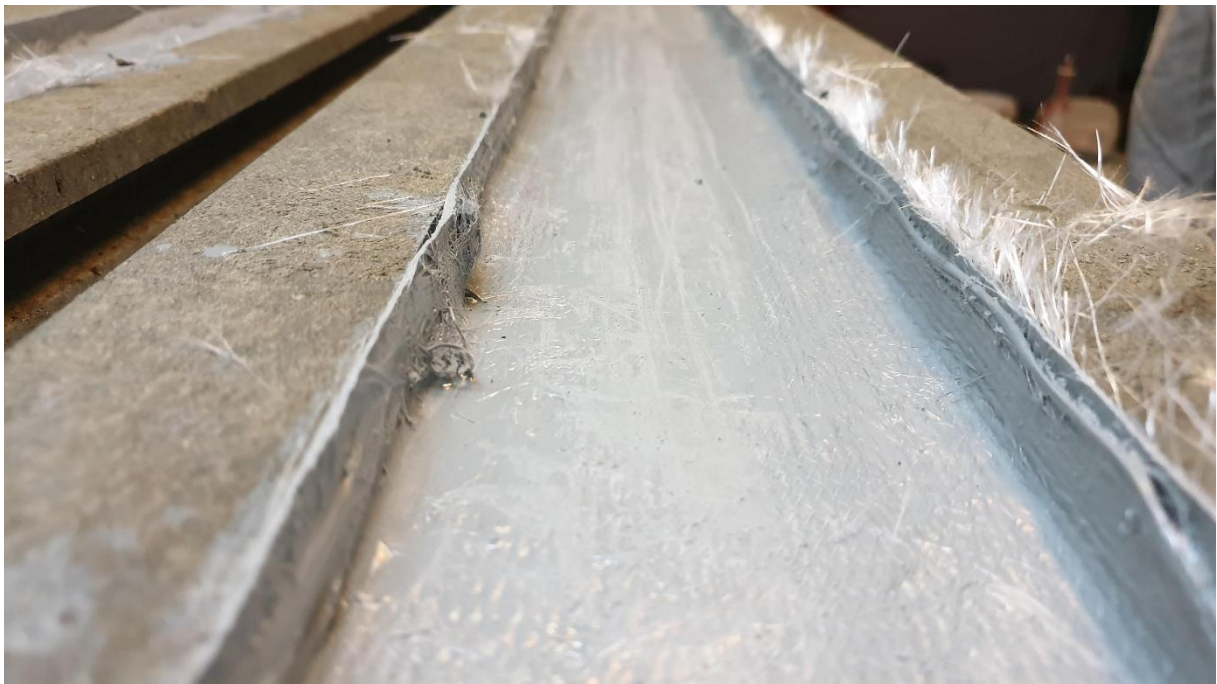


Na het verder lamineren van de genoemde glasmat wordt hierop een UD-glaslegsel 900 g/m² met een breedte van 140 mm (breedte sponning) aangebracht en gelamineerd.





Na geleren van de hars wordt het uitstekende deel boven de sponning afgesneden met een uitschuifmes. Hiermee is de eerst laag virgin GVK gereed.



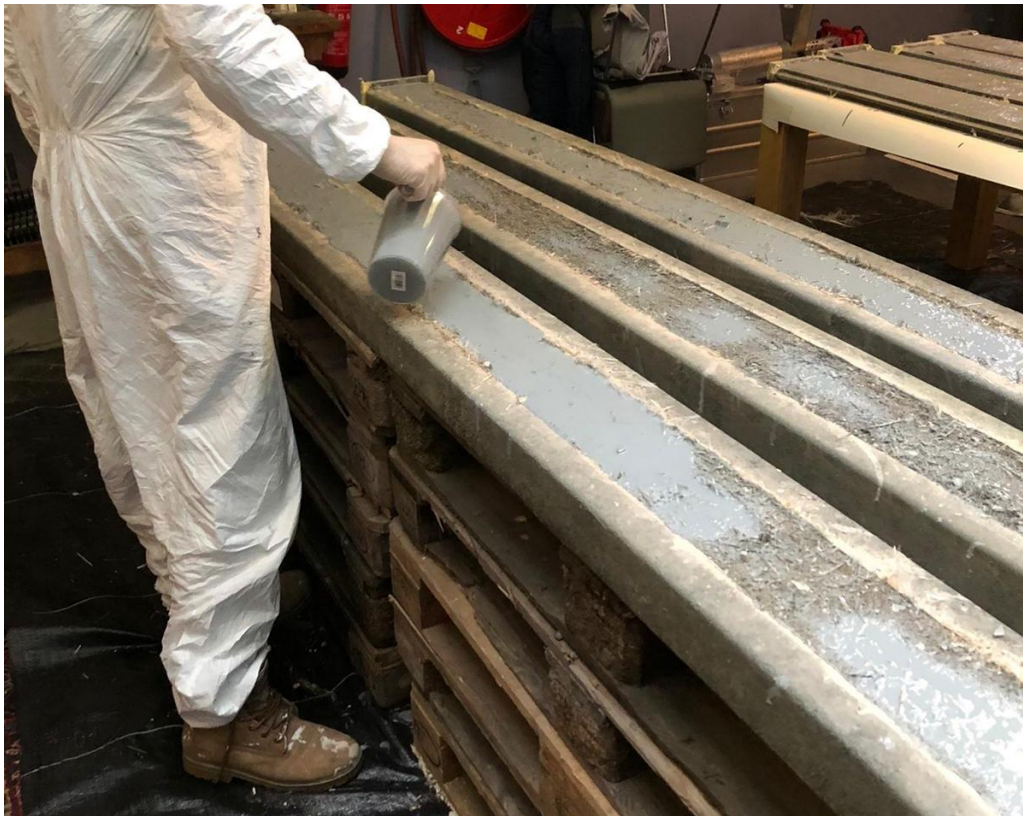
Het uitgeharde oppervlak van de eerste versterkingslaag wordt licht opgeschuurd. Vervolgens worden de holtes van de profielen gevuld met vlokken van hergebruikt composiet en nagestrooid met droog zand (combinatie 1-2 mm en 2-4 mm) om de holtes op te vullen.



De kern is klaar om afgegoten te worden met polyesterhars.



De vlokkenkern met zand wordt afgegoten met polyester giethars (met 10 % lichtgrijze polyester pigmentpasta).



Na het afgieten van de vlokkenkern wordt op het nog natte oppervlak opnieuw een 140 mm brede UD-laag en vervolgens als laatste twee stroken van 200 mm brede 450 g/m² glasmat gelamineerd (ook met de polyester giethars) en harsrijk afgeharst.



In totaal zijn 4 damwandplanken en 3 balkprofielen van Save Plastics voorzien van een inlay met hergebruikt composiet. De foto hieronder toont de vier gerede planken met inlays.



Doorsnede van een damwandplank van Save Plastics voorzien van inlay van hergebruikt composiet.



Lectoraat Kunststoftechnologie

Hybride Hergebruik Kunststoffen

**RAAK-MKB-project in combinatie
met RegioDeal Overijssel**

Over het lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.

Samenvatting

In dit RAAK-MKB-project is onderzocht of er combinaties te maken zijn door het hergebruiken van verschillende, moeilijk te recyclen kunststoffen. Het gaat hierbij om End-of-Life stromen van thermoharde composieten, mix-plastics en autobanden. Dit hybride hergebruik heeft als voorwaarde dat een resulterend nieuw product zo ontworpen is dat dit ook aan het einde van de levensduur weer goed te hergebruiken is: 'design for circularity'.

Het project heeft geresulteerd in twee bruikbare hybride ontwerpen: 1) Een dekprofiel van mix-plastics die versterkt is met een inlage van hergebruikt composiet.

2) Een verende geleidebalk met een omkasting van hergebruikt composiet en een verende kern van autoband rubber. Van deze ontwerpen zijn full-scale prototypes gemaakt en getest.

Het project is uitgevoerd in samenwerking met een groot consortium van 53 partners, onderzoekers van het lectoraat, docenten en studenten.