Lectoraat Kunststoftechnologie

Industrieel hergebruik van EoL thermoharde composieten

Circulaire Economie



hogeschool Windesheim



Wendy van Schooten, Jasper Bouwmeester, Margie Topp, Pieter Schreuder, Albert ten Busschen en Peter Bosman.

Colofon

Titel:	Industrieel hergebruik van end-of-life thermoharde composieten
Publicatienummer:	LKT-RE-106851-1903
Datum:	September 2019
Auteurs:	A. ten Busschen PhD, M.D.C. Topp PhD, J. Bouwmeester MSc MBA, P. Schreuder BSc, P. Bosman Msc, E. Roetman MSc
Subsidieverstrekker:	NWO – Regieorgaan SIA
Met medewerking van:	Zie volgende pagina met logo's van deelnemende partners
Fotografie:	Hogeschool Windesheim, lectoraat Kunststoftechnologie
ISBN:	978-90-801727-0-8
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 Internationale-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.


aliancys
QUALITY RESINS


BiinC
composites
innovations
sustainability


bootjessloperij
het Harpje


Techniek
brimos
wegbebakening & verkeersgeleiding


CERTION
turbine support team


Composite
STRUCTURES




DemacqRecycling
INTERNATIONAL


Fatol
KUNSTSTOFFEN


Fiby Products


FlexxCon


FPi
FUTURE PIPE INDUSTRIES


provincie
groningen


GRONINGEN SEAPORTS


krafton
VAN BIJL


MLS Management


NedTrain


NJI
NEDERLANDSE JACHTBOUW INDUSTRIE


Nouryon
Formerly AkzoNobel
SPECIALTY CHEMICALS


Federatie NRK




Polem


Poly Products
Maatwerk in composieten
PP


Reimert
Bouw en Infrastructuur


REMONDIS®


Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu


Royal
HaskoningDHV
Enhancing Society Together


Sphagnum
PRODUCTS BV


S-pod
gebruiksklare badkamers


TENCATE
ADVANCED COMPOSITES


TU Delft


VDL


WELEX


Composiet Service


gemeente
Zeewolde


WATERSCHAP
ZUIDERZEELAND

Voorwoord

Dit rapport beschrijft de activiteiten en resultaten van het RAAK-MKB-project 'Industrieel hergebruik van end-of-life thermoharde composieten'. Het project is uitgevoerd van oktober 2017 tot oktober 2019 onder leiding van het Lectoraat Kunststoftechnologie van Windesheim. Het project volgde op een reeks KIEM-VANG-projecten in de periode 2015-2017, waarin de behoefte naar voren kwam van de MKB-bedrijven om de methode van hergebruik van composieten op een industrieel niveau te krijgen. Wij zijn de deelnemers aan het project dankbaarheid verschuldigd voor hun inbreng en hun geloof in de ontwikkeling. Regie-orgaan SiA willen we in het bijzonder bedanken voor de beschikbaar gestelde financiering voor dit project.

Dr. Ir. Albert ten Busschen, Projectleider

In 2050 zullen kunststoffen een belangrijke bijdrage leveren aan de CO2-neutrale en circulaire economie. De eigenschappen van kunststoffen zorgen ervoor dat de milieu impact van een kunststof product over de totale levenscyclus in de meeste gevallen het beste scoort. Dat geldt ook voor thermoharde producten, mits de cyclus hiervan dan circulair is. Daarvoor zal een combinatie van oplossingen moeten worden ontwikkeld variërend van de ontwikkeling van nieuwe circulaire composieten en additieven, circulaire ontwerpoplossingen, inzamelsystemen en recycling-technologie. Dit RAAK-project over hergebruik van composiet materiaal vormt daar een mooie schakel in. Het hergebruik van het materiaal in nieuwe hoogwaardige producten, zorgt ervoor dat het materiaal in de materiaalcyclus kan blijven en geeft tijd en ruimte om nieuwe recycling technologieën te ontwikkelen. Een relevant onderzoek dus, waar NRK graag haar naam en inzet aan heeft verbonden. Maar daarnaast ook een vitaal onderzoek, dat een prachtig voorbeeld is van het beste wat RAAK projecten te bieden hebben. Goede en inspirerende samenwerking tussen bedrijven, onderzoekers en studenten, met degelijk maar pragmatisch toegepast onderzoek waar de bedrijven direct mee aan de slag konden, zodat het project niet alleen demonstrators heeft opgeleverd, maar ook producten die hun weg naar de markt al hebben gevonden.

Ir. Martin van Dord (Innovatiecoach NRK en Holland Chemistry), Lid Stuurgroep

Zelden heb ik zo vaak verwezen naar de activiteiten in een onderzoeksproject als naar dit RAAK-project. Onze klanten, mijn collega's, studenten in mijn gastcolleges bouw-technologie en civiele techniek: allemaal vragen ze om circulaire oplossingen voor vezelversterkte kunststoffen (VVK). De duurzaamheid van VVK wordt gewaardeerd maar de noodzaak tot ontwikkeling van oplossingen voor een toekomstig tweede leven en verder is zeer groot. In dit project wordt niet alleen kennis opgebouwd en oplossingen ontwikkeld. Maar omdat parallel gewerkt wordt door enthousiaste partijen uit een breed veld, aan industrialisatie en regelgeving, werken we samen aan een snelle, succesvolle implementatie! En doordat we nu al een eerste brugdek hebben van gerecycled composiet, op de Dinzerbrug in Friesland, is het vertrouwen dat we tot een circulair VVK komen gesterkt. Maar ook als wrijfgording of robuust kernmateriaal zie ik veel kansen. Dankzij die concrete toepassingen kan VVK zich verder ontwikkelen als duurzaam en sustainable bouwmateriaal!

Ir. Liesbeth Tromp (Royal Haskoning DHV), Lid Expertgroep

23 september 2019

Samenvatting

In dit project 'Industrieel hergebruik van end-of-life thermoharde composieten' is onderzocht of de methode van hergebruik van end-of-life (EoL) thermoharde composieten op industriële schaal kan worden toegepast. Deze centrale praktijkvraag viel voor het onderzoek in twee deelvragen uiteen: kan het economische rendabel worden voor de industrie, en kan een kwaliteitsniveau worden gegarandeerd. Deze deelvragen zijn onderzocht aan de hand van de realisatie van een vijftal demonstrators met een groot consortium van 36 partners, onderzoekers van het lectoraat en studenten.

De belangrijkste stromen EoL thermoharde composieten worden op dit moment gevormd door de polyester bootrompen en rotorbladen van windmolens, die eerst moeten worden verkleind alvorens te kunnen verwerken tot een grondstof. Voor rotorbladen van windmolens is het nodig een eerste verkleiningsstap op locatie te doen om kostbaar transport van de grote rotorbladen te voorkomen. Hiervoor is snijden met een mobiele watersnijder naar voren gekomen als geschikte techniek. Voor de verdere verwerking komt uit het onderzoek het shredderen tot vlokken als economische manier naar voren. Binnen het project is een prototype shredder ontwikkeld en getest.

Bij het verwerken van de vlokken tot een grondstof voor hergebruik is uit het onderzoek naar voren gekomen dat er een aantal minimum eisen gesteld moeten worden aan de vlokken. Zo is het nodig de vlokken uit de verschillende typen EoL composiet gescheiden te houden. Dit is van belang in verband met de gebruikte matrix (in hoofdlijn: polyester of epoxy) en de gebruikte versterking (in hoofdlijn: random versterking of georiënteerde versterking). Verder zijn de volgende minimum eisen geformuleerd voor de verwerkbaarheid van de vlokken: droog, stofvrij en ontvet/hechtend. Verder is de geometrie van de vlokken in klassen verdeeld tot een aantal 'grades'.

Bij de vervaardiging tot nieuwe producten op basis van de vlokken zijn verschillende technieken onderzocht. Met een vacuüm-injectietechniek (onder folie of in een mal) zijn goede producten te realiseren maar het gebruik van nieuwe (virgin) hars is vrij hoog: ca. 50% van het totaalgewicht van het nieuwe product. Bovendien is deze techniek arbeidsintensief. Door het gebruik van pultrusie kan het gebruik van nieuwe hars teruggebracht worden tot ca. 30% van het totaalgewicht en is de benodigde arbeid veel geringer. Binnen het project is een prototype push-pultrusie-lijn ontwikkeld en getest. Hiermee is aangetoond dat een continu-productie van een damwandplank gemaakt met hergebruikt composiet in de vorm van fijne vlokken mogelijk is.

Voor het maken van platen is een schuimende kunststof als bindmiddel gebruikt en kon met een persproces het gebruik van nieuwe hars teruggebracht worden tot ca. 10% van het totaalgewicht. Echter door de benodigde arbeid tijdens de perscycli is het een te kostbaar proces gebleken voor industrialisatie.

De vijf demonstrators zijn alle succesvol geïnstalleerd en blijken in het gebruik ook goed te voldoen, zoals blijkt uit de volgende samenvattingen.

Bij de Beatrixsluis in Almere is een oeverbeschoeiing gerealiseerd met 80 plankprofielen. Deze profielen konden probleemloos worden ingetrild. Na twee jaar zijn twee profielen eruit getrokken en beproefd op sterkte en die bleek behouden t.o.v. de beginsterkte.

Er zijn OSB-achtige platen geperst ('rHPL-panelen') die zijn toegepast bij de interieurinrichting van het T-gebouw van Windesheim. Ook zijn deze platen gebruikt voor een demonstratie in de muur van een houtskeletbouw woning. Verder bleken deze rHPL-panelen ongevoelig voor de inwerking van vocht, al of niet in combinatie met vriezen.

Voor het maken van een draglineschot zijn 5 balken gemaakt en samengesteld tot een schot. In praktijktests door Welex bleek dit schot te voldoen bij gebruik in zware omstandigheden.

Er is een constructieve ligger gemaakt met een buitenmantel van virgin glasvezelversterkt polyester, een binnenmantel van hergebruikt composiet en een kern van PET-schuim. Deze ligger is getest bij de TU-Delft op buigstijfheid en sterkte en leverde goede waarden op.

Er is een prototype wrijfgording gemaakt en getest op sterkte bij de TU-Delft. De sterkte bleek ruimschoots te voldoen aan de vereiste sterkte voor schepen die was opgegeven door het ingenieursbureau van de Provincie Groningen.

Tijdens het project dienden er zich ook twee additionele demonstrators aan die door de projectdeelnemers zelf zijn geïnitieerd. Dit betrof de dekplanken voor de Dinzerbrug in Friesland (inmiddels gerealiseerd) en de productie van 26 wrijfgordingen voor de verwerking in een viertal remmingwerken in Delfzijl (realisatie najaar 2019).

De vervaardigde producten zijn onderzocht op fysische eigenschappen. De bestandheid tegen vochtinwerking blijkt goed te zijn. Verder zijn de mechanische eigenschappen goed wat betreft stijfheid en impactbestandheid. Echter, de mechanische sterkte valt tegen en vertoont relatief veel spreiding. Uit de mechanische testen aan de wrijfgordingen en de ligger blijkt echter wel dat ondanks de lage sterkte-bijdrage van de vlokkenvulling deze toch een versterkend effect geeft aan een nieuwe (virgin) versterkte laag aan de buitenzijde. Door de hoge stijfheid en drukvastheid van de vulling werkt deze stabiliserend voor de zijde op druk en kan deze beter schuifspanningen door-leiden dan bijvoorbeeld een schuimkern.

Voor het gebruik in het ontwerp kan de vlokkenvulling goed worden ingezet voor een stijfheidsbijdrage en het door-leiden van schuifspanningen. Er blijkt dat 90% van de initiële productstijfheid behouden blijft, waarmee gerekend kan worden. Door de discontinuïteit van de vlokkenvulling wordt gesteld dat deze niet moet worden meegenomen voor het ontwerpen op een kruipbelasting of een vermoeiingsbelasting.

Bij het onderzoek naar sterkte is opnieuw de methode van verkleinen als belangrijke invloeds-factor naar voren gekomen. De stroken die uit de ontwikkelde shredder komen blijken enigszins geknikt, hetgeen resulteert in een mindere vulling (veel holtes) en daardoor automatisch tot een relatief lage bijdrage in stijfheid en sterkte. Maar de sterkte die aanvankelijk nog in het composiet aanwezig was blijkt door het shredderen te zijn verlaagd. Vanuit constructief oogpunt wordt daarom geadviseerd om te onderzoeken of er toch een ander verkleiningsproces mogelijk is waarmee rechte, niet-geknikte en relatief ongehavende stroken gemaakt kunnen worden.

De kosten voor een product van hergebruikt composiet worden voor een groot gedeelte bepaald door het gebruik van additionele nieuwe (virgin) grondstoffen, vooral hars. In het project is een calculatiemodel ontwikkeld. Hierbij wordt het product van hergebruikt composiet vergeleken met een prijsniveau waar het op dit moment kan concurreren met tropisch hardhout. Hierin is de huidig geaccepteerde meerprijs i.v.m. een langere levensduur die beschikbaar is verdisconteerd. Hieruit blijkt dat een break-even in de kosten optreedt bij een gebruik van nieuwe grondstoffen van ca. 30% van het gewicht van het eindproduct. Verder kunnen de arbeidskosten laag blijven door gebruik te maken van een continuproces, zoals een pultrusie-techniek.

Door verschillende uitvoeringen van een damwandplank te analyseren met de EcoCalculator van EuCIA is onderzocht wat de CO2-footprint is voor het maken van deze uitvoeringen. Op deze wijze is een eerste stap gezet naar een Life Cycle Analyse (LCA) voor het hergebruiken van composiet. Achtereenvolgens zijn van een damwandplank met dezelfde afmetingen en functionele prestaties de volgende uitvoeringen op deze manier

geanalyseerd: virgin GVK-mantel met hergebruikt composiet kern gemaakt met injectietechniek, virgin GVK-mantel met virgin kunststof schuimkern, virgin GVK-mantel met GVK-tussenschotten (hol pultrusieprofiel) en virgin GVK-mantel met hergebruikt composiet kern gemaakt met pultrusie-techniek. Uit de analyse blijkt dat met de laatstgenoemde uitvoering met een hergebruikt composiet kern gemaakt met pultrusie-techniek leidt tot de laagste CO2-footprint. Deze gunstige CO2-footprint wordt veroorzaakt door het lege gehalte aan virgin grondstof in deze uitvoering.

Vanuit de composietindustrie is de belangstelling voor het project groot. Er zijn veel vragen geweest voor het geven van presentaties, interviews en masterclasses. Het project is wereldwijd innovatief. Het grote aantal hits op het artikel in het Elsevier vaktijdschrift 'Reinforced Plastics' leidde tot de vraag om een vervolgartikel. Het project werd ook opgenomen in de Nationale Composiet Agenda en is als zodanig tijdens 's werelds grootste composietbeurs JEC in 2019 gepresenteerd als één van de icoon-projecten. Ook vanuit de windenergie-branche is er veel interesse voor het project om het probleem van EoL windmolenrotoren op te lossen die ook van thermoharde composiet zijn gemaakt. In dat kader is het lectoraat benaderd door de Duitse energieproducent RWE en door de Nederlandse organisaties NWEA en Smart Port.

Tijdens het project zijn 5 afstudeeropdrachten en 2 stages uitgevoerd door studenten van de studierichtingen werktuigbouw en civiele techniek. Daarnaast zijn er in de minoren Composieten, Applied Mechanics en Production Engineering 30 deskstudie-opdrachten en 3 groeps-opdrachten uitgevoerd op deelaspecten van het project. Bovendien zijn het principe van hergebruik van composieten, de bijbehorende aanpak van mechanische berekeningen, beoordeling van de LCA en een aantal cases uit het project opgenomen in het curriculum van de genoemde minoren en in de master-opleiding Polymer Engineering.

Ook buiten Windesheim hebben de opleidingen interesse voor de methode van hergebruik van composieten. Vanuit Hogeschool Zeeland heeft een afstudeerstudent Civiele Techniek een constructie ontworpen van profielen op basis van hergebruikt composiet. Een afstudeerstudent van de afdeling Industrial Ecology van de TU-Delft heeft het lectoraat benaderd voor informatie over hergebruik van composieten voor de afstudeeropdracht op het gebied van recycling van windturbine-rotoren. Naar aanleiding van ons artikel in Reinforced Plastics heeft de MES College of Engineering in Kuttipparam (India) ook de methode van hergebruik ter hand genomen voor opdrachten van zes afstudeerderstudenten.

Vanuit het project zijn aanbevelingen geformuleerd. Aanbevolen wordt te onderzoeken om de vlokkenvulling gedeeltelijk te vervangen door een volume van hergebruikte afvalkunststof die niet te recyclen is ('mix-plastics'). Hiermee zou het gebruik van nieuwe hars verder kunnen worden teruggedrongen en wordt een hogere circulariteit bereikt omdat de afvalkunststoffen niet worden verbrand. Verder wordt aanbevolen om het shredderproces opnieuw te optimaliseren tot een soort 'broodzaag' waarmee rechte en ongehavende stroken worden verkregen zodat een betere sterktebijdrage en een betere vulbaarheid in een nieuw product bereikt worden. Ook wordt geadviseerd om het gebruik van pultrusie voor het verwerken van de vlokken verder industrieel op te schalen om hiermee producten te maken voor met name de natte infrabouw. Tenslotte is het van belang om de ontwikkelingen bij te houden op gebied van circulair inkopen, zoals de overheid dat van plan is om met ingang van 2023 te gaan doen. Dit levert mogelijk een nog betere business case waarbij niet alleen op basis van prijs moet worden geconcurreerd.

Lijst van 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)
CUR	Civieltechnische Uitvoeringsrichtlijn
DCPD	Dicyclopentadieen, basismonomeer voor DCPD-type polyesterhars
EN	Europese Norm
EP	Epoxy
EoL	End-of-Life, na het 'leven' van een product
EoU	End-of-Use, na de gebruiksduur van een product
EuCIA	Europese brancheverenigingen 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 Shear Strength, interlaminaire afschuifsterkte
JEC	Journées Européennes de Composites, wereldwijde composietbeurzen
KIEM-VANG	Projectvorm van Regie-orgaan Sia in het kader van VANG i.s.m. MKB
LCA	Life Cycle Analysis, 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
OSB	Oriented Strand Board, plaatmateriaal gebaseerd op houtvlokken
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
RVS	Roestvast Staal
SiA	Nationaal Regie-orgaan voor Praktijkgericht onderzoek (onderdeel van NWO)
SMC	Sheet Moulding Compound, polyestergebaseerde prepreg voor warmpersen
UD	Unidirectionaal, 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
rCVVK	Vezelversterkte Kunststof gemaakt met hergebruikt composiet

Inhoudsopgave

Samenvatting 3

1. Inleiding 9

1.1 End-of-life thermoharde composieten 9

1.2 Eerdere KIEM-VANG-projecten 10

1.3 Doel en opzet van het project 13

2. Inzameling en verwerking EoL composiet 15

2.1 Introductie 15

2.2 Inzameling 15

2.3 Verwerken 18

2.4 Voorverkleinen 22

2.5 Verkleinen 25

2.6 Sorteren 30

2.7 Nabewerken 32

2.8 Conclusies 32

3. Verwerking tot nieuwe producten 33

3.1 Evaluatie van mogelijke verwerkingstechnieken 33

3.2 Vacuüm-injectie 36

3.3 Perstechniek 43

3.4 Pultrusie 45

4. Toepassingen: demonstrators 49

4.1 Oeverbeschoeiing 49

4.2 rHPL-panelen 55

4.2.1 Testen 55

4.2.2 Meubels 57

4.2.3 Demonstrator voor bouwtoepassing 58

4.3 Draagligger 58

4.4 Dragline-schot 59

4.5 Wrijfgordingen 61

4.6 Extra: dekplanken Dinzerbrug 63

5. Eigenschappen en ontwerpregels 65

5.1 Ontwerpsystematiek volgens Eurocode en CUR 65

5.2 Aanvullende eisen aan her te gebruiken VVK-delen en classificatie 68

5.3 Proevenprogramma en resultaten 71

5.4 Eisen voor bezwijkgedrag met r-VVK en beproeving van r-VKK 78

5.5 Materiaalfactoren, conversiefactoren, kruip- en vermoeiingsbreuk 82

5.6 Aanbevelingen voor het ontwerp 83

6. Business Case – zowel economisch als in duurzaamheid 87
6.1 Introductie Werkpakket 5 87
6.2 Financiële haalbaarheid 87
6.2.1. Parameters van invloed op de business case 88
6.2.2 Tool 90
6.2.3 Uitkomsten en overwegingen van de Business Case 91
6.3 LCA 92
6.3.1 Tool keuze: EcoCalculator EuCIA 93
6.3.2 Parameters - aannames 93
6.3.4 Vergelijkingen – proces 94
6.3.5 Vergelijkingen – planken 95
6.3.6 Laatste Opmerkingen en Conclusies 99
7. Kennisverspreiding, presentatie en onderwijs 100
8. Conclusies en aanbevelingen 102
Appendix 1 Bijeenkomsten, interviews, presentaties, paneldiscussies, media 105
Appendix 2 Productiegegevens en foto's 113
Appendix 3 Deelnemers project 141
Appendix 4 Studentenopdrachten 143
Literatuur 148

1. Inleiding

1.1 End-of-life thermoharde composieten

Thermoharde composieten zijn vezel-versterkte kunststoffen waarbij een thermoharde kunststof is gebruikt. Dit is een kunststof die aanvankelijk vloeibaar is (kunsthars) en samen met de versterkingsvezels tot een product kan worden vormgegeven. Na uitharding van de kunststof ontstaat een sterk en vormvast product. Het materiaal kan worden ontworpen tot zeer lichte en sterke constructies. Bovendien is de bestandheid tegen aantasting vaak zeer goed waardoor de producten onderhoudsarm zijn en een lange levensduur hebben.

In de afgelopen 70 jaar hebben thermoharde composieten een brede toepassing gevonden in diverse gebieden. De genoemde voordelen in combinatie met de vormgevingsvrijheid geven mogelijkheden die met andere materialen niet te realiseren zijn. Daardoor wordt het materiaal op grote schaal toegepast in lucht- en ruimtevaart, jachtbouw en voor rotorbladen van windmolens. Maar in tal van andere toepassingen hebben composieten een prominente plek gevonden, zoals in de procestechniek (tanks en silo's), de bouw (gevels, bruggen en sluizen), automobielbouw (carrosserie en chassis), sport en recreatie, etc.



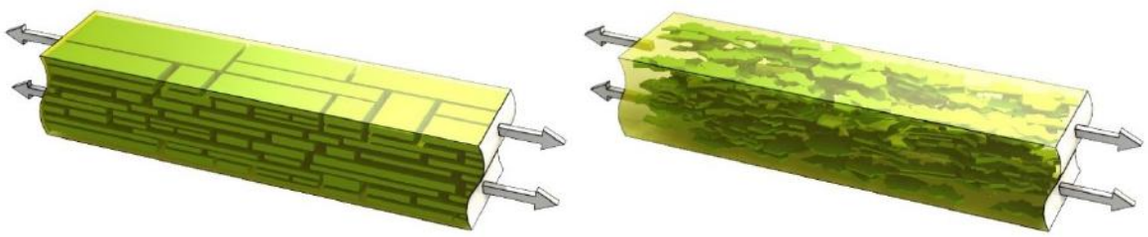
Het lage gewicht van composieten in combinatie met de lange levensduur maakt dat deze materialen op zichzelf al een relatief duurzaam karakter hebben als ze vergeleken worden met zware materialen (zoals steen en beton) of met materialen die sneller degraderen (zoals hout en staal). Toch komen ook composieten uiteindelijk aan het einde van hun gebruik (end of use) danwel aan het einde van hun levensduur (end of life). In het vervolg zullen beide stadia samen behandeld worden onder de term End of Life: EoL. Een ideale recycling van EoL composietproducten zou dan weer versterkingsvezels en thermoharde kunsthars opleveren waarmee nieuwe producten kunnen worden gemaakt.

Deze ideale recycling is tot dusver niet gevonden. De belangrijkste reden hiervoor is dat de thermoharde kunststof niet meer kan smelten en daardoor niet zonder degradatie van de versterkingsvezels gescheiden kan worden. Maar zelfs als de vezels worden gescheiden van de kunststof (door het chemisch oplossen ervan of door afbranden) blijven versterkingsvezels over die letterlijk en figuurlijk 'verknipt' zijn. In letterlijke zin zijn de vezels op maat geknipt (of gesneden) voor een bepaald product en hebben dus niet meer een universele verwerkingsvorm (bijvoorbeeld een spoel of een rol). Maar ook zijn ze in figuurlijke zin verknipt omdat de eigenschappen niet meer als vanouds zijn: het hechtmiddel op de vezels is verdwenen en de intrinsieke sterkte van de vezel is sterk verlaagd (Thomason, Jenkins, Yang 2016).

1.2 Eerdere KIEM-VANG-projecten

In de periode 2015 – 2017 zijn bij het Lectoraat Kunststoftechnologie (LKT) zes KIEM-VANG-projecten uitgevoerd om een andere methode voor de verwerking van EoL thermoharde composieten te onderzoeken. (Een KIEM-VANG-project is een toepassingsgericht haalbaarheidsonderzoek op het gebied Van Afval Naar Grondstof – VANG – in samenwerking met het midden- en kleinbedrijf.)

De onderzochte methode wordt aangeduid met 'hergebruik van composieten' en heeft als uitgangspunt de versterkingsvezels en de thermoharde kunststof niet te scheiden. Dit samenstel is immers nog mechanisch sterk en vochtbestendig. In plaats daarvan wordt het EoL composietproduct in grote stukken gezaagd of geshredderd tot vlokken en de ontstane delen worden als versterkingselementen gebruikt om nieuwe producten te maken. Dit gebeurt door de versterkingselementen samen te binden met nieuwe (virgin) hars, eventueel met toevoeging van nieuwe versterkingsvezels.



De resultaten van de genoemde KIEM-VANG-projecten zullen in het volgende kort worden samengevat omdat deze de opmaat hebben gevormd naar het onderhavige project.

KIEM-VANG 1 EoL composiet in Nederland

In dit project is in kaart gebracht welke soorten stromen EoL composiet er in Nederland zijn en om welke hoeveelheden het gaat. Op dat moment was dat overzicht nog niet beschikbaar. Samen met de betrokken bedrijven kwam het LKT voor 2015 tot de volgende stromen:

Type product	EoL (ton / jaar) in Nederland
Polyester jachtrompen	1400
Rotorbladen windmolens	1300
Dakplaten / golfplaten	1000
Veevoeder silo's	800
TOTAAL	4500

Bij veel toepassingen van composieten bleek de EoL nog niet op gang gekomen te zijn vanwege de lange levensduur (bijvoorbeeld bij gevelpanelen, bruggen, sluizen, industrie-tanks, riool-relining en zwembaden). EoL composiet uit printplaten (Printed Circuit Boards) is substantieel van hoeveelheid (geschat: 3400 ton per jaar in Nederland) maar komt niet in aanmerking voor hergebruik omdat deze stroom verbrand wordt vanwege terugwinnen van metalen. De stroom EoL composiet uit toepassingen in transport (vliegtuigen, treinen, auto's) en in sport was in het onderzoek niet meegenomen. Een latere, completere studie in opdracht van de gemeente Lelystad (Drogt en Veldman, 2018) gaf een totaalgetal voor EoL composiet in Nederland beschikbaar voor hergebruik van 6000 ton per jaar.

KIEM-VANG 2 Soorten producten te maken van hergebruikt EoL composiet

Door het samenbinden van relatief grote stukken EoL composiet tot een nieuw product ontstaan producten die relatief zwaar zijn en ook geen fijne detaillering kunnen hebben. Wel kan een hoge mechanische sterkte bereikt worden met een goede waterbestandheid.

De deelnemende bedrijven en het LKT kwamen tot de conclusie dat met de methode van hergebruik van EoL composietproducten met name profielvormige en plaatvormige producten kunnen worden gemaakt. Toepassingen zullen met name te vinden zijn waar gewicht geen belangrijke rol speelt maar wel sterkte en waterbestandheid vereist zijn, dus vooral in de bouw en de (natte) infrabouw.

KIEM-VANG 3 Hergebruikt EoL composiet in de vorm van stroken

In dit onderzoek is het hergebruiken in de vorm van stroken onderzocht. Met watersnijden kunnen composietdelen waarmee andere materialen (metaal, hout, rubber) geïntegreerd zijn worden gesneden tot stroken. Het is echter een relatief kostbare bewerkingsmethode.

Met een serie buigproeven is vervolgens het effect van strooklengte op de eigenschappen van het nieuw gevormde product onderzocht. Met name de buigsterkte van het nieuw gevormde product wordt bepaald door de lengte van de stroken waaruit het product is opgebouwd. Door lange stroken te gebruiken zijn buigsterktes van ca. 200 MPa te verkrijgen in het nieuw vervaardigde product.



KIEM-VANG 4 Hergebruikt EoL composiet in de vorm van vlokken

Het hergebruiken van vlokken voor het maken van een nieuw product is onderzocht in dit onderzoek. Het shredderen van een EoL composietproduct tot vlokken is duidelijk een minder kostbaar proces dan het zagen of snijden tot stroken. Anderzijds zijn de te verkrijgen buigsterktes in het nieuw vervaardigde product op deze manier mogelijk tot ca. 100 MPa.

KIEM-VANG 5 Symposium hergebruikt EoL composiet

Op woensdag 5 oktober 2016 is een symposium georganiseerd waarin de resultaten van de eerste vier KIEM-VANG-projecten zijn gepresenteerd. De bijeenkomst werd georganiseerd op de Campus van Windesheim en ca. 80 deelnemers waren erbij aanwezig. In de discussies bij de presentaties toont men zich enthousiast dat er eindelijk een oplossing is voor de EoL thermoharde composietproducten. Anderzijds komen er kritische vragen: is er een voldoende productkwaliteit te garanderen voor producten gemaakt van hergebruikt composiet en is het een economisch haalbare technologie. Samengevat is de vraag die naar voren kwam: 'Is de technologie te ontwikkelen tot een industrie?'

KIEM-VANG 6 Oeverbeschoeiing van hergebruikt EoL composiet

Bij dit project is onderzocht of er oeverbeschoeiingspanelen kunnen worden vervaardigd van EoL thermoharde composieten. De eisen voor een dergelijk product voor wat betreft verwerking en toepassingen waren afkomstig van Reimert Bouw en Infra en het Waterschap Zuiderzeeland. Op deze wijze is een plankprofiel ontwikkeld met dezelfde detaillering en sterkte als een traditionele hardhouten plank die in Nederland veel voor oeverbeschoeiing wordt gebruikt.



1.3 Doel en opzet van het project

Uit het voorgaande komt duidelijk naar voren dat het hergebruiken van EoL thermoharde composieten technisch mogelijk is en tot interessante toepassingen van nieuwe producten kan leiden. Maar kritische vragen zijn er gelijktijdig ook geuit door de diverse betrokkenen. Kan de methode bijvoorbeeld economisch interessant worden voor bedrijven om te gaan gebruiken? Ofwel: is er geld mee te verdienen? En kan de methode leiden tot kwalitatief goede producten met een betrouwbare kwaliteit?

Samengevat luidt de vraag: 'Is industrialisatie mogelijk van het hergebruiken van EoL thermoharde composieten?' Het doel van dit project is om deze vraag uit te werken en te onderzoeken of deze industrialisatie inderdaad mogelijk is.

Hiertoe is in het voorjaar van 2017 een projectaanvraag opgesteld. Nationaal Regieorgaan Praktijkgericht Onderzoek SiA heeft deze aanvraag voor het onderhavige project 'Industrieel hergebruik van EoL thermoharde composieten' goedgekeurd onder dossiernummer RAAK.MKB06.001. Het project heeft als looptijd oktober 2017 – oktober 2019. In deze aanvraag is de volgende praktijkvraagstelling geformuleerd als uitgangspunt:

'Kan de nieuw ontwikkelde methode voor het hergebruiken van EoL thermoharde composieten op een technisch en economisch verantwoorde wijze in de praktijk ingezet worden?'

De behandeling van deze praktijkvraagstelling is gedaan met een aantal demonstrators die zijn gerealiseerd met behulp van de ontwikkelde methode. Aan de hand hiervan werd per demonstrator onderzocht op welke manier deze wordt vervaardigd uit EoL thermoharde composiet en op welke wijze deze wordt toegepast. Op basis van de bevindingen uit de eerdere KIEM-VANG-projecten zijn de volgende vijf demonstrators geselecteerd waarmee de praktijkvraagstelling is onderzocht:

Demonstrator 1 Oeverbeschoeiing
Demonstrator 2 Panelen (rHPL)
Demonstrator 3 Draagligger
Demonstrator 4 Dragline-schot
Demonstrator 5 Wrijfgording in remmingwerk

Gedurende het project zijn er spontaan twee extra demonstrators bij gekomen. De eerste betreft de dekplanken voor het brugdek van de Dinzerbrug. Deze demonstrator is ook in dit rapport beschreven (Hoofdstuk 4). De tweede extra demonstrator zijn de wrijfgordingen die in opdracht van Groningen Seaports zijn geproduceerd ten behoeve van remmingwerken in het havengebied van Delfzijl. Deze wrijfgordingen waren ten tijde van de afronding van deze rapportage nog niet gemonteerd en zijn daarom niet in deze rapportage beschreven.

De vervaardiging en toepassing zijn specifiek per demonstrator maar er zijn ook een aantal generieke onderwerpen die voor alle demonstrators gelden. Dit betreft de logistiek en verwerking van de EoL thermoharde composiet tot een nieuwe grondstof, de te gebruiken ontwerpmethodiek en rekenregels en de analyse van de business case. Om alle onderwerpen te behandelen is het project gestructureerd middels een vijftal werkpakketten:

WP 1	EoL thermoharde composieten: logistiek en bewerking tot grondstof
WP 2	Vervaardigen van elementen voor de demonstrators
WP 3	Plaatsing en monitoring van de demonstrators
WP 4	Tests mechanische eigenschappen en opstellen van ontwerpregels
WP 5	Business Case: economische haalbaarheid en circulariteit

Stuurgroep

Voor het project is een stuurgroep aangesteld. Deze stuurgroep heeft 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 bestaat uit:

Ir. Martin van Dord	(Innovatiecoach NRK en Holland Chemistry)
Ir. Ben Drogt	(BiinC en vertegenwoordiging van CompositesNL)
Bas Reimert	(Reimert Bouw en Infra)

Expertgroep

Voor het bewaken van een aantal belangrijke kwaliteitskenmerken van het onderzoek is voor het project een expertgroep aangesteld. De expertgroep heeft als belangrijkste taak het bewaken van de kwaliteit van de onderzoek uitvoering. Specifiek beoordeelt de expertgroep de evaluatie van de mechanische tests. De expertgroep bestaat uit:

Dr. Ir. Ing. Sotiris Koussios	(TU-Delft, tot eind 2018)
Ir. Liesbeth Tromp	(Royal Haskoning DHV)

Leeswijzer

De volgende vijf hoofdstukken van dit rapport (hoofdstuk 2 t/m 6) zullen achtereenvolgens beschrijvingen geven van de werkzaamheden en resultaten van de werkpakketten. In deze hoofdstukken wordt verwezen naar detailinformatie in de appendices en de literatuurlijst.

Daarna zal in hoofdstuk 7 aangegeven worden op welke wijze de opgebouwde kennis is verspreid en gepresenteerd. Tevens zal specifiek in dit hoofdstuk worden aangegeven op welke wijze het onderwijs is betrokken bij het onderzoek en hoe de resultaten worden gebruikt in het curriculum van de betrokken opleidingen.

Hoofdstuk 8 geeft de conclusies van het onderzoek en aanbevelingen voor vervolg.

2. Inzameling en verwerking EoL composiet

2.1 Introductie

Voordat het EoL thermoharde composiet geschikt is voor hergebruik moet het materiaal eerst worden ingezameld, gesorteerd en verwerkt in een logistiek proces. Tijdens dit proces wordt bijvoorbeeld een windmolen rotorblad of polyester boot gedemonteerd, verkleind tot vlokken en daarna gezeefd. Dit materiaal kan daarna worden gesorteerd zodat het geschikt wordt gemaakt voor de productie van nieuwe producten.

In het eerste werkpakket zijn de mogelijkheden voor het inzamelen, sorteren en verwerken nader onderzocht. Er is een start gemaakt door te onderzoeken hoeveel EoL composiet er beschikbaar is in Nederland en wat de kwaliteit is van dit materiaal. Hierna is bepaald aan welke eisen het verwerkte EoL materiaal (de vlokken) moet voldoen om het te gebruiken in producten van hergebruikt composiet. Als laatste zijn de mogelijkheden in kaart gebracht waarop dit materiaal kan worden verwerkt voor hergebruik. Hiervoor zijn industriële methodes vergeleken om het proces van verkleinen, sorteren en nabewerken uit te voeren.

Hoofdstuk 2.2 beschrijft in welke hoeveelheden EoL composiet beschikbaar komEN in Nederland. In hoofdstuk 2.3 wordt onderzocht welke definitie voor vlokspecificatie het best in de praktijk gebruikt kan worden. In het vervolg van dit hoofdstuk wordt het industriële proces beschreven om het EoL composiet geschikt te maken voor hergebruik. Verschillende manieren om het materiaal te verwerken worden hierin beschreven.

2.2 Inzameling

Eerdere onderzoeken binnen Hogeschool Windesheim (KIEM VANG) en van externe partijen (EuCIA) hebben een beeld gegeven van de hoeveelheid thermohard composiet afval die jaarlijks vrijkomt. Dit onderzoek geeft ook een indicatie van de hoeveelheden afval die in de toekomst gaat ontstaan. Dit is een actueel vraagstuk omdat composiet steeds vaker wordt toegepast en doordat de eerst geproduceerde producten het einde van de gebruiksduur inmiddels heeft bereikt.

Composieten (vezelversterkte thermoharde kunststoffen) worden toegepast in producten met verschillende technische eigenschappen. Dit is mogelijk doordat er verschillende soorten hars en vezels worden gebruikt, zo kunnen polyester-gebaseerde of epoxy-gebaseerde harsen zijn gebruikt. De technische eigenschappen worden ook beïnvloed door de lengte, opbouw en de richting van de vezels. Zo worden bijvoorbeeld in polyester boten tot zes meter veelal korte vezels aangebracht in een willekeurige richting; in windmolens worden meestal lange gestrekte vezels gelegd in een patroon van meerdere lagen. Vanwege deze verschillen in het materiaal is het belangrijk om niet alleen de hoeveelheid composiet afval in kaart te brengen maar ook de bron van het materiaal, zodat beter kan worden ingeschat hoe het materiaal is samengesteld. Dit is weergegeven in tabel 2.1

Segment	Voorbeeldproduct	Karakteristiek
Aerospace	Fairing	Hoogwaardig composiet, veelal carbon of hoogwaardig glas. Georiënteerd, hoog vezelvolume. Epoxy hars.
Windenergie	Wiek	Hoog vezelvolume, hoge vezel oriëntatie. Epoxy of vinylester hars. Meestal glasvezel.
Consumenten artikelen	Racefiets frame	Carbon of carbon/glas mix. Epoxy.
Elektronische apparaten en elektronica (E&E)	PCB's	Epoxy glas laminate. Hoog gevuld met fireretardant additieven.
Bouw	Luxe regengoot	Basis composiet, random vezels, polyester hars.
Tanks en buizen	Industriële buis	Gewikkelde continue glasvezel met een epoxy of vinylester hars
Transport	Vrachtwagen zijpanelen	Continu gelamineerde panelen. Deels continu vezel, deels chopped fiber. Polyester hars.
Marine	Sloep	Random, kortvezelig glas met polyester hars.

Tabel 2.1 samenstelling composietproducten

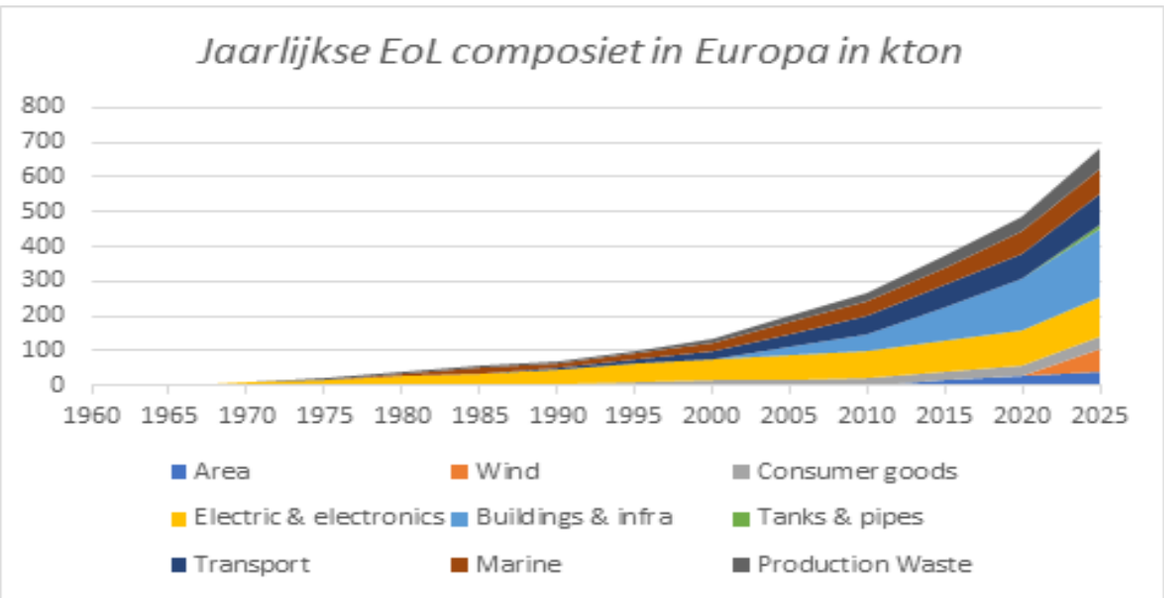
Dit overzicht benadrukt dat binnen elke industrie en voor vrijwel elke productgroep composiet anders is samengesteld. Om deze reden kan EoL composiet het beste ingezameld worden door de industrie waarin het wordt gebruikt. Binnen deze industrieën is de specifieke kennis voorhanden over de herkomst en samenstelling van het materiaal.

Er zijn geen exacte gegevens van de hoeveelheid EoL composiet die voorhanden is. De inzameling van composiet is momenteel nog niet zo georganiseerd dat er precieze informatie beschikbaar is over de verschillende composiet afvalstromen. In de studies waarin de hoeveelheid EoL composiet is bepaald, zijn daarom modellen gebruikt waarmee een goede inschatting kan worden gemaakt van de hoeveelheid composietafval in Nederland. Hierbij zijn er een drietal uitdagingen:

- Precieze informatie over de inkoop, gebruik en verkoop van composietproducten is niet voor alle branches en productgroepen beschikbaar;
- Producten worden soms in een ander land geproduceerd dan dat het wordt gebruikt. In Nederland worden composiet-producten zowel geïmporteerd als geëxporteerd;
- Verschillende composiet-producten, zoals windmolens, worden na de gebruiksduur in Nederland verkocht aan klanten in andere landen.

Er zijn verschillende methodes gebruikt om in te schatten hoeveel materiaal beschikbaar komt. De eerste methode is van de EuCIA die is uitgegaan van de totaal geproduceerde hoeveelheden ingangsmateriaal. De verwachtte hoeveelheid EoL composiet in Europa bedraagt volgens deze methode 2222 kTon in het jaar 2015.

De gebruikte data is aangeleverd door leveranciers uit de composiet industrie en is op mondiale schaal onderzocht door JEC Composites (2017). Op basis van deze studie heeft EuCIA een inschatting gemaakt van de hoeveelheid composietafval in Europa. Zij hebben hiervoor aangenomen dat het Bruto Binnenlands Product (BBP/GDP) een inschatting geeft hoeveel composiet er wordt gebruikt in een regio. Zij hebben daarom de verhouding van het BBP van de wereld en Europa gebruikt om een inschatting te maken van het jaarlijkse composietgebruik in Europa. Dus als Europa zo'n 22 procent bijdraagt aan het mondiale BBP dan is de aanname dat Europa ook 22 procent van de geproduceerde composietproducten gebruikt. Op basis van deze berekening is een overzicht gepresenteerd van het jaarlijkse composietgebruik voor een aantal kernsectoren. Daarna is op basis van de gemiddelde gebruiksduur van composietproducten een inschatting gemaakt van de jaarlijkse (te verwachten) composiet afvalstroom. Dit is te lezen in de onderstaande tabel.



Grafiek 2.1: Jaarlijkse composietgebruik in Europa in kton. Bron: EuCIA 2017

In dit onderzoek is ook onderzocht of afvalstromen beschikbaar zijn voor hergebruik. Het blijkt dat een groot deel (45%) van de composiet afvalstromen nog niet beschikbaar is voor recycling omdat het niet als zodanig uit de afvalstroom wordt gehaald. De verwachting is dat tussen 2015 en 2025 de beschikbare hoeveelheid composiet EoL-materiaal verder toeneemt. Hierna wordt een verdere stijging voorzien vanwege de grotere hoeveelheid windmolen rotoren.

Een aanvullende KIEM VANG studie is uitgevoerd door het lectoraat Kunststoftechnologie (ten Busschen et al. 2016). Hiervoor zijn interviews met experts en bestaande studies gebruikt om een inzicht te krijgen in het composiet-afval in Nederland. Eerder gepubliceerde informatie is geactualiseerd met recente marktgegevens en de context van nieuwe hergebruikmethodes in Nederland. In de studie kwam naar voren dat de grote afvalstromen werden gevormd door polyester bootrompen, windmolenrotorenbladen, veevoersilo's en polyester dakplaten. De onderzoekers hadden het toenmalige composiet afval in Nederland (in 2015) geschat op 4,5 kton EoL composiet per jaar; een hoeveelheid die toe gaat nemen in de komende jaren. De grootste afvalstroom is 1,4 kton/jaar polyester bootrompen in 2015 dat naar verwachting oploopt tot 4 kton/jaar in 2030. EoL composiet uit windmolens leidde al tot 1,3 kton/jaar in 2015; een afvalstroom die in de komende jaren ook verder toeneemt.

Niet alleen in Nederland wordt een toename van deze stromen EoL composietafval verwacht. In België wordt bijvoorbeeld in 2025 jaarlijks 2-3 kton en in Duitsland jaarlijks 20 kton composietafval van EoL windmolen rotorbladen verwacht (Ovam, 2016). Als deze informatie over composiet wordt vergeleken met de totale kunststof afvalstroom in Nederland dan is composiet een relatief kleine afvalstroom. De totale hoeveelheid thermoplastisch afval bedroeg in Nederland namelijk zo'n 500 kTon in 2015. Van dit totaal werd in Nederland momenteel ongeveer 50% gerecycled (de overige 'mix-plastics' wordt voorlopig nog verbrand). Desalniettemin is er een gestaag toenemende stroom aan EoL composiet dat gebruikt kan worden voor hergebruik.

2.3 Verwerken

In de volgende paragrafen is beschreven hoe van EoL composiet afval een doelmateriaal kan worden gemaakt. Het doelmateriaal is een bruikbaar materiaal dat input is voor de productie van een nieuw product. Het is dus feitelijk een halffabricaat in de productie van een nieuw, gerecycled composieten eindproduct.

De keuze van het doelmateriaal wordt deels bepaald door de mogelijkheden van de bewerkingsstappen. In de onderstaande tabel is beschreven wat de voor- en nadelen zijn van zowel kleine als grote vlokken.

	Kleine vlok (poeder)	Grote vlok (>5 cm)
Mechanische eigenschappen	--	++
Verkleiningsstappen (benodigde energie)	-	+
Verkleiningsstappen (complexiteit)	+	-
Gemak in processing tijdens bewerkingsproces	++	--
Benodigd nieuw materiaal bij hergebruik	--	+

Tabel 2.2: voor- en nadelen van verschillende vlokkengroottes

Als het materiaal erg klein wordt gemaakt dan is het in de vervolgstappen niet meer dan een vulstof zonder dat het een bijdrage levert aan de mechanische eigenschappen. In sommige composiet-producten wordt bijvoorbeeld calcium carbonaat (krijt) gebruikt als goedkope vulstof. Dit kost slechts rond de 50 euro per ton (€ 0,05 / kg); door deze lage kosten is het lastig om van EoL composiet een concurrerende vulstof te maken.

Als het EoL composiet wordt verwerkt tot relatief grove stukken dan kunnen producten worden gemaakt met goede technische eigenschappen. Maar de verwerking van dit materiaal is echter complex en daardoor erg kostbaar voor producenten. Voor de verdere verwerking van het EoL composiet moeten dus vlokken worden gemaakt met een optimale grootte. Het moet enerzijds groot genoeg zijn om een bijdrage te leveren aan de mechanische eigenschappen en anderzijds moet het efficiënt verwerkbaar zijn.

Binnen dit onderzoek is de ideale vlokgrootte onderzocht door composiet te vergelijken met de houtsnippers in OSB (Orientend Strand Boards) platen. Een methode om de optimale overlap tussen vlokken te bepalen is door een plaat te maken met een vergelijkbare opbouw als een OSB-plaat (Rasheed, 2016). Door voor deze methode te kiezen kan een (houten) OSB-plaat dienen als referentie omdat deze platen een ideale pakking hebben van de vlokken.

Overeenkomsten met OSB

Deze paragraaf bevat de resultaten omtrent OSB- platen, omdat deze vergelijkbaar zijn met de platen die gemaakt worden van composiet vlokken. Oriented Strand Board's worden gemaakt van vlokken hout die onder hoge druk tot één geheel verlijmd worden.

Uit een onderzoek (Okino en Souza, 2007) naar fysische en mechanische eigenschappen van OSB platen blijkt dat er met een vlokgrootte van 0,7x20x70 mm (d x b x l) platen gemaakt kunnen worden met 5-8% UF-hars opname. De platen zijn gemaakt van Cupressus Glauca Lam hout. Deze platen bestaan voor 95% uit hout en 5% uit wax en hars (PF, MUF of PDMI). In een andere studie is bepaald dat de gemiddelde lengte van vlokken in een OSB-plaat 11,75 cm zijn in lengterichting zijn en 7,6 cm in breedte-richting (Painter et al, 2005).

Harsopname composiet vlokken



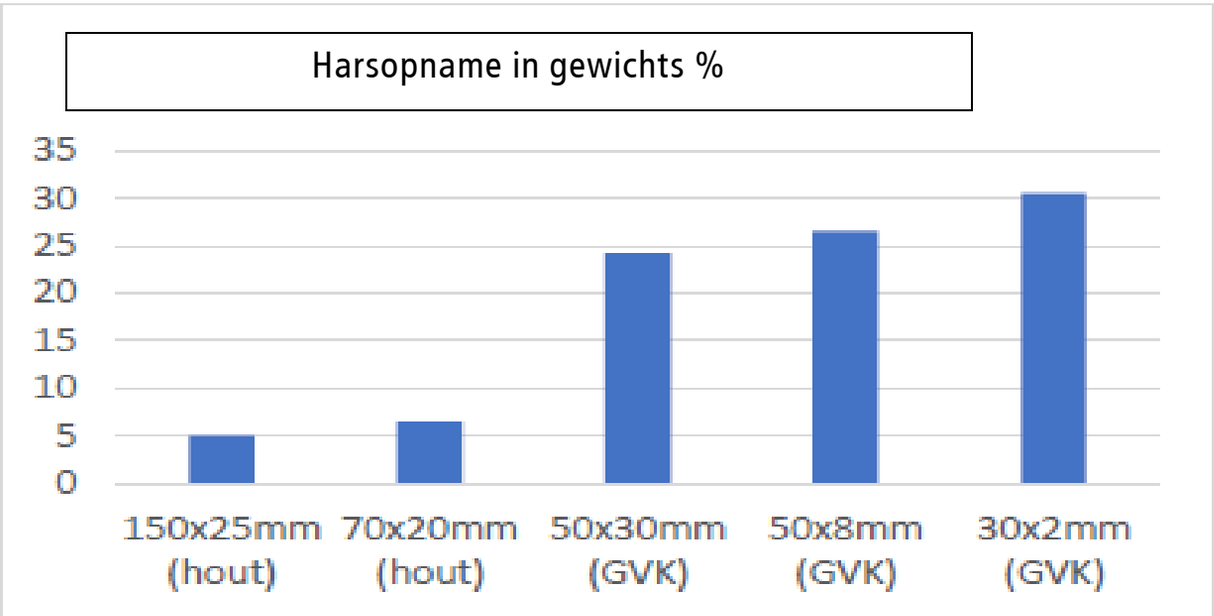
Figuur 2.1 testopstelling harsopname

Er is een testopstelling gemaakt om te bepalen wat de invloed van de vlokgrootte is op de harsopname van het eindproduct. De uitkomsten zijn in de onderstaande grafiek weergegeven. Hierbij zijn de "hout" resultaten de waardes uit de studie van Okino en Souza (2004) gebruikt als referentie. Het grote verschil met de waardes voor hout laat ook meteen zien, dat in de methode nog een grote mogelijkheid voor optimalisatie zit.



Figuur 2.2: samengestelde product

Een kanttekening hierbij is dat de vlokken bij OSB allemaal vlak liggen in een plaat (2d) maar in de proefopstelling lagen de vlokken niet vlak maar in alle mogelijke richtingen (3d). Doordat de vlokken niet vlak lagen waren er meer holtes tussen het materiaal die gevuld werden met hars. Ondanks dit verschil laat de proef duidelijk zien dat als kleinere vlokgroottes worden gebruikt er ook een hogere harsopname wordt gemeten.



Grafiek 2.2 Harsopname in procenten

Grotere vlokken leiden tot een ruwere oppervlakte van een product, wat duidelijk zichtbaar is in de onderstaande fotoreeks. In deze reeks zijn de vlokken van verschillende grootte gebonden met een schuimende polyurethaan hars.

			
≤ 4 mm	10 x 10 t/m 15 x 1,5	25 x 10 t/m 15 x 1,5	50 x 10 t/m 15 x 1,5

Figuur 2.3 oppervlakte van proefstukken

Een mogelijke optimalisatie (waar tijdens dit onderzoek niet naar is gekeken) is vergelijkbaar met het proces dat wordt gebruikt tijdens de productie van spaanplaat. In dit proces worden aan de buitenkant kleinere vezels gebruikt voor een goede afwerking en in het midden grotere vlokken voor sterkte. Deze verwerkingsmethode heeft echter een nadelig effect op de buigsterkte van het materiaal.

Specificatie materiaal

Aangezien elke verkleiningsmethode in de praktijk een range aan productgroottes van vlokken zal opleveren, is gekozen om op basis van de resultaten een indeling te maken. Dit ziet er als volgt uit:



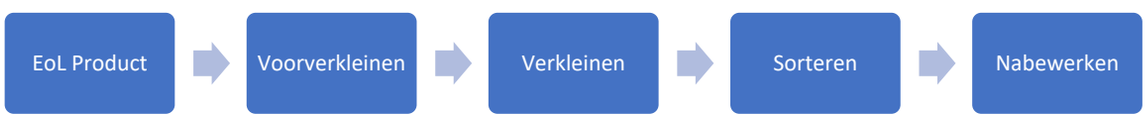
Figuur 2.4: indeling materiaal

Hierbij is categorie A1 het feitelijke doelmateriaal. A2 heeft vergelijkbare afmetingen maar doordat het een andere bron heeft zijn de eigenschappen anders. B kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor oppervlaktelagen en D is voornamelijk vulmateriaal (C is een mix van A1, A2, B en D). Tabel 2.3 toont een overzicht.

Grade		Origin	Lengte		Breedte	Dikte
			>	<		<
A1	coarse	high end	25 mm	150 mm	50 mm	2 mm
A2	coarse	low end	25 mm	150 mm	50 mm	5 mm
B	fine	all end	5 mm	50 mm		2 mm
C	mix (c,f,p)	all end	0 mm	150 mm	50 mm	5 mm
D	powder	all end	0 mm	10 mm		2 mm
				>		>
X	reprocess			150 mm	50 mm	5 mm
X	Vocht, andere materialen			X		

Tabel 2.3: samenstelling vlokken

Binnen dit werkpakket is verder onderzocht wat de beste methode is om zoveel mogelijk materiaal binnen de A-categorie vlokken te produceren. Grofweg kent de procedure voor het produceren van deze vlokken de stappen die zijn weergegeven in figuur 2.5, welke in de komende paragrafen in deze volgorde verder zullen worden toegelicht.



Figuur 2.5: methodiek voor het verkrijgen van de juiste vlokken voor verdere verwerking.

2.4 Voorverkleinen

Transport van grote composiet onderdelen naar een verwerkingsstation is een dure aangelegenheid. Vanuit economisch perspectief moeten bijvoorbeeld de rotorbladen van een windmolen eerst verkleind worden, maar ook voor boten en tanks en buizen is het beter om deze te verkleinen op locatie zodat het materiaal op een efficiënte wijze in een container kan worden vervoerd.

Het verkleinen op locatie van bootrompen is getest met een standaard sloopschaar. Hiermee is een bootromp snel en effectief te verkleinen tot een formaat dat in een container past. Aangezien dit een gebruikelijke sloopmethode is voor boten, lijkt dit de voorkeur te hebben qua kosten en efficiëntie die te behalen is. Voor 1 bootromp is een sloopschaar ongeveer 15 minuten bezig om deze in het juiste formaat te krijgen. Bij een uurtarief van 100 euro (inclusief operator), betekent dit dus 25 euro aan voorverkleiningskosten.



Figuur 2.6: een aantal standaard sloop scharen (bron: Vermetal.be).

Tanks en buizen zijn niet verkleind tijdens het onderzoek met een sloopschaar, maar doordat de wanddikte vergelijkbaar is met die van polyester boten lijkt ook hier het samendrukken met een sloophamer de meest efficiënte methode.
Windmolen roterbladen worden in de praktijk ook meestal verkleind voor transport. Als de rotoren niet worden verkleind kunnen deze tot een lengte van 30 á 40 meter met een gewicht van 6 tot 8 ton nog met speciaal transport over land kunnen worden vervoerd. De kosten voor het transport van een dergelijk rotorblad over 100 tot 200 km varieert tussen de 2000 en 4000 Euro afhankelijk van de obstakels onderweg, omgerekend dus € 0,25/ kg tot € 0,50/ kg). Moderne rotorbladen boven de 40 meter lengte kunnen niet meer over land worden vervoerd. Het op locatie verkleinen van de roteren is hierdoor goedkoper en dus zelfs ook noodzakelijk.

Het verkleinen van windmolen rotorbladen is echter een complexe activiteit vanwege de grootte en de samenstelling van het materiaal. Ten eerste is een sloopschaar niet standaard op de locatie aanwezig. Ten tweede is de doorsnede van een rotorblad zodanig groot dat een sloopschaar hier wel een hap uit kan nemen, maar vervolgens niet snel en eenvoudig het hele rotorblad doormidden kan knippen. Om dit op te lossen is in een separaat project met Certion gekeken naar het gebruikt van een groter formaat sloopschaar.

Een andere mogelijkheid is het water-snijden op slooplocatie. Dit is een flexibele methode die het bedrijf Demacq toepast. Een uitdaging hierbij is dat al het vezel-houdend snijafval opgevangen moet worden. Een EoL rotorblad kan het beste na demontage worden verkleind tot stukken van circa 10 meter lengte voor gewoon transport. Dit kost een operator met een mobiele watersnijder 4 uur per rotorblad met een totaal uurtarief van 120 euro per uur. Omgerekend voor een rotorblad is dit ca. € 0,08 / kg. Het transporteren van het rotorblad in stukken over 100 tot 200 km zal dan € 300,- kosten, omgerekend ca. € 0,05 / kg.



Figuur 2.7: watersnijden op locatie (bron: demacq.com)

Een derde mogelijke methode is een zaagtechniek die ook gebruikt wordt om steen van groot formaat te zagen. Hierbij wordt een lang koord met abrasief materiaal om het product gespannen en rondgetrokken. Het voordeel hiervan is dat de benodigde materieel zeer goedkoop en eenvoudig is. Het is echter een uitdaging om het snijstof op te vangen dat vrijkomt tijdens het zagen. Dit type zaag is echter in Nederland veel minder aanwezig dan de sloopscharen of de watersnijders.
Uiteindelijk zijn alle drie de onderzochte technieken voor het verzagen van composieten windmolen-rotoren toepasbare methodes. In de praktijk zal de keuze afhangen welke techniek beschikbaar en kosten gunstig is voor een aannemer.

2.5 Verkleinen

Bij het verkleinen is gekeken naar mogelijke industriële methodes om het EoL composiet te verkleinen tot vlokken van de optimale grootte.

Hamermolen

Een hamermolen bestaat uit een cilindrische kamer met daarin een snel ronddraaiende rotor waaraan scharnierende hamers zitten. Door de centrifugale kracht worden de hamers naar buiten gedrukt tot op een paar centimeter van een aambeeld waarover het materiaal wordt aangevoerd. Het materiaal wordt door de hamers geleidelijk in steeds kleinere stukken geslagen. Wanneer het materiaal klein genoeg is, valt het door een zeef in de bodem van de kamer.



Figuur 2.8: hamermolen (Bron: Bryan Derksen 2007)

Tijdens een bedrijfsbezoek is ook een test gedaan en is het materiaal geanalyseerd dat door een hamermolen verkleind is. Tijdens de test zijn verschillende soorten materiaal door de shredder verkleind. Het materiaal wordt goed verkleind maar er is een grote variatie in de vlokken (output). Bovendien is het materiaal nat doordat water werd gebruikt om stofvorming tegen te gaan.

Voordelen: de verwerking van composiet materiaal in een hamermolen verloopt snel en er treedt amper slijtage op aan de machine.

Nadelen: de aanschaf van een hamermolen is duur, hij verbruikt veel energie en bij het vermalen wordt relatief veel composiet materiaal tot stof geslagen. Er is veel verschil in het formaat van de vermalen stukken en het materiaal is nat.

Snijmolen

De snijmolen werkt door een rotor met messen rond te laten draaien in een kamer met messen langs de wand. Het materiaal wordt aan de bovenzijde aangevoerd en door de messen in stukken gesneden. Onderin de kamer zit een zeef waardoor materiaal dat klein genoeg is, afgevoerd wordt.

Voordelen: het formaat van de verkleinde stukken is redelijk constant, de doorlooptijd is goed (maar wel afhankelijk van het formaat van de molen en het gewenste eindformaat) en er komt weinig stof vrij bij het proces.

Nadelen: er is redelijk wat voorbereiding van het te vermalen materiaal nodig omdat er bijvoorbeeld geen metaal in mag zitten. Daarnaast treedt er snel slijtage op aan de machine: de messen worden bot door het glas in het composiet.

Kogelmolen

Een kogelmolen verkleint materiaal door het samen met kogels en een holle cilinder rond te draaien. De kogels, met een hoge soortelijke dichtheid en hardheid, vermalen en vermengen het materiaal tot de machine stop wordt gezet. Zie figuur 2.9 voor een schematische weergave van een kogelmolen.



Figuur 2.9: schematische weergave kogelmolen

Voordelen: het is een gesloten proces waardoor er geen tot weinig stof vrij komt tijdens het proces. Het formaat van het eindresultaat is goed beheersbaar en redelijk constant.

Nadelen: het is een nauwkeurige methode waarbij veel geëxperimenteerd zal moeten worden met draaitijden (de verwachting is dat die verschillen per materiaal en misschien zelf per batch) en er zal waarschijnlijk een aanzienlijk deel van het materiaal vermalen worden tot poeder of te kleine stukken.

Shredder

Een shredder werkt door assen met daar op snijbladen naar elkaar toe te laten draaien. Het materiaal wordt van boven aangevoerd en door de snijbladen getrokken en in repen gescheurd. Shredders bestaan in varianten met twee of vier assen, en de vorm van de snijbladen verschilt per te vermalen materiaal.



Figuur 2.10: shredder. Bron Uswasukur (2015)

Voordelen: het materiaal wordt is redelijk contante stukken gescheurd, er is waarschijnlijk weinig slijtage aan de machine en, er komt relatief weinig stof vrij omdat de machine op laag een toerental werkt.

Nadelen: de machine, en specifiek de snijbladen, zullen speciaal voor hergebruik van composiet ontworpen moeten worden, omdat bestaande machines er vooral op gericht zijn het materiaal zo klein mogelijk te maken. Er wordt daarbij geen rekening wordt gehouden met buiging van het materiaal, waardoor mechanische eigenschappen verloren kunnen gaan.

Rasper

Een rasper werkt door een rotor met daarop meerdere rijen met 'tanden' rond te draaien in een kamer waarin soms tanden zijn verwerkt met een negatieve snijhoek. Het materiaal wordt vanaf de bovenkant door zwaartekracht, of van de zijkant met externe druk, op de rotor gedrukt waardoor de tanden steeds een stukje van het materiaal happen.

Voordelen: het materiaal wordt in redelijk constante stukken gehapt en de doorlooptijd is goed.

Nadelen: er is voorbereiding van het materiaal nodig omdat er geen metaal in mag zitten, de machine is aan slijtage onderhevig en er komt redelijk wat stof vrij bij het verkleinen. Ook verbruikt de machine veel energie.

Maalmolen

Een maalmolen combineert de werking van een snijmolen en een shredder met haak-achtige snijbladen. De haken verdelen het te vermalen materiaal en verzorgen de eerste verkleining, waarna de messen het materiaal verder verkleinen naar een constant formaat. Hierdoor kan de maalmolen op een laag toerental werken en komt er weinig stof bij vrij.

Voordelen: zeer geschikt voor het malen van composiet materiaal door laag toerental en tweetraps verkleining.

Nadelen: er is voorbereiding nodig omdat er geen metaal in het materiaal mag zitten en na verloop van tijd zullen de snijvlakken bot worden.

Vergelijking van de methodes

Van elk van de bovengenoemde technieken is een beoordeling gemaakt op gebied van de kostprijs, proces, resultaat en veiligheid. In het algemeen kan gesteld worden dat bij verkleining:

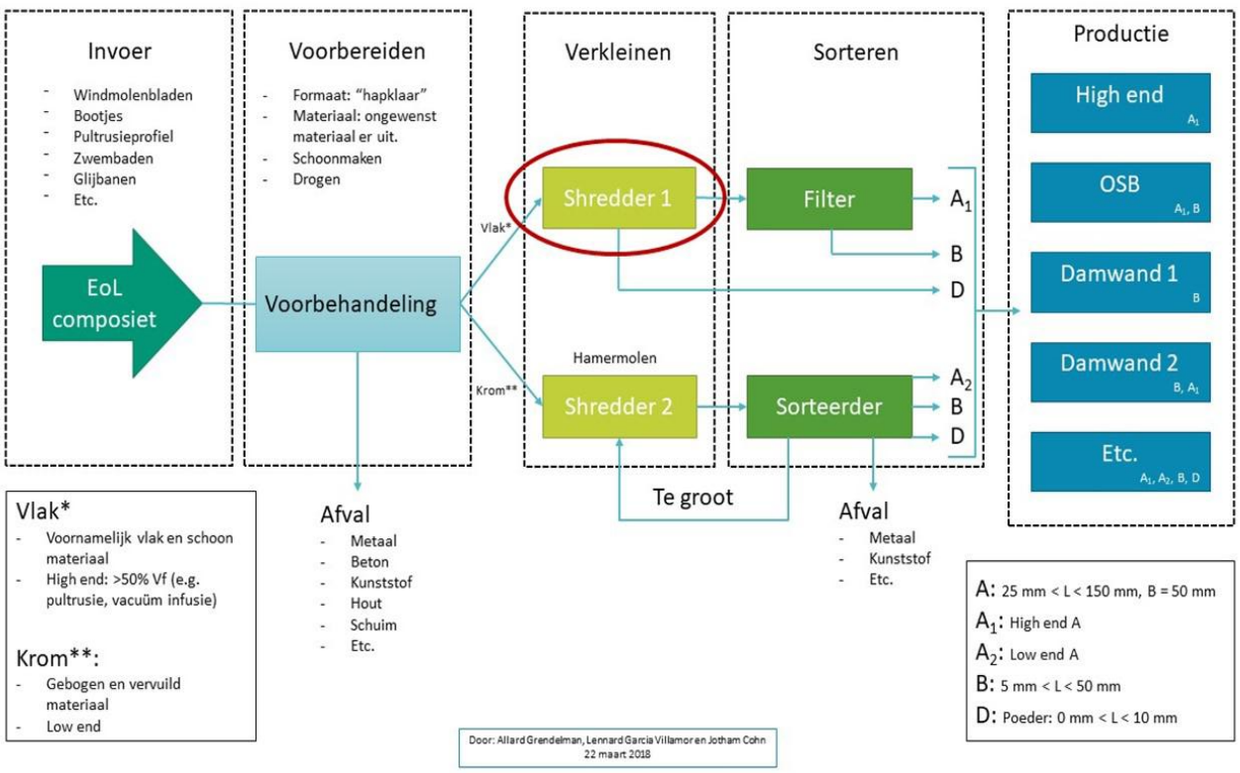
- relatief veel van het materiaal te klein wordt geslagen;
- door een hoog toerental veel stof vrij komt;
- door snijden verschillende machineonderdelen slijten.

De onderstaande tabel geeft de overige resultaten van het vergelijk schematisch weer.

	Prijs			Proces		Resultaat			Veiligheid	
	Investering	Draaikosten	Onderhoudskosten	Voorbereiding	Doorlooptijd	Constante vlokgrootte	Beheersbaarheid vlokgrootte	Te klein materiaal	Stofvorming	Verwondingsgevaar
Machinaal										
Hamermolen	--	-	++	++	++	-	--	--	--	0
Snijmolen	0	-	--	--	0	+	+	-	-	0
Kogelmolen	-	+	+	0	--	0	0	-	-	+
Shredder	0	+	+	+	0	+	+	+	+	0
Rasper	0	0	--	--	+	+	0	0	-	0
Maalmolen	0	+	0	-	-	+	0	0	+	+

Tabel 2.4: overzicht van resultaten

Om het composiet te verkleinen kan een deel worden verkleind met een shredder en het overige deel met een hamermolen. Dit betekent dat de delen die geschikt zijn voor verwerking door een shredder worden verkleind en dat de restanten door een hamermolen worden verkleind. Het lijkt dan ook logisch om in een productieopstelling te kiezen voor twee verkleinstations: een shredder waar redelijk gecontroleerd materiaal ingaat en welke voornamelijk A1 of A2 kwaliteit product levert en een hamermolen die de minder gedefinieerde stukken kan behandelen tot B, C of D-kwaliteit.



Figuur 2.11: schematische vergelijking methodes

Mede omdat de hamermolen al getest is tijdens een bedrijfsbezoek, is tijdens het vervolg van het onderzoek de focus gelegd op het ontwikkelen van een shredder om te kijken of dit inderdaad de verwachtte vlokfractie kan leveren.

Ontwikkeling van shredder voor onderzoek

Om te bepalen of verkleinen door een shredder een mogelijkheid is, is gekozen om voor het onderzoek een passende shredder te produceren. Omdat de exacte benodigde vlokgrootte nog niet bekend was, is ervoor gekozen om de messen variabel te maken. De uitvoering van de messen (de breedte van de sleuven en vertanding) bepaalt de afmetingen van de vlok die geproduceerd wordt.



Geen overlap, messen snijden het product niet



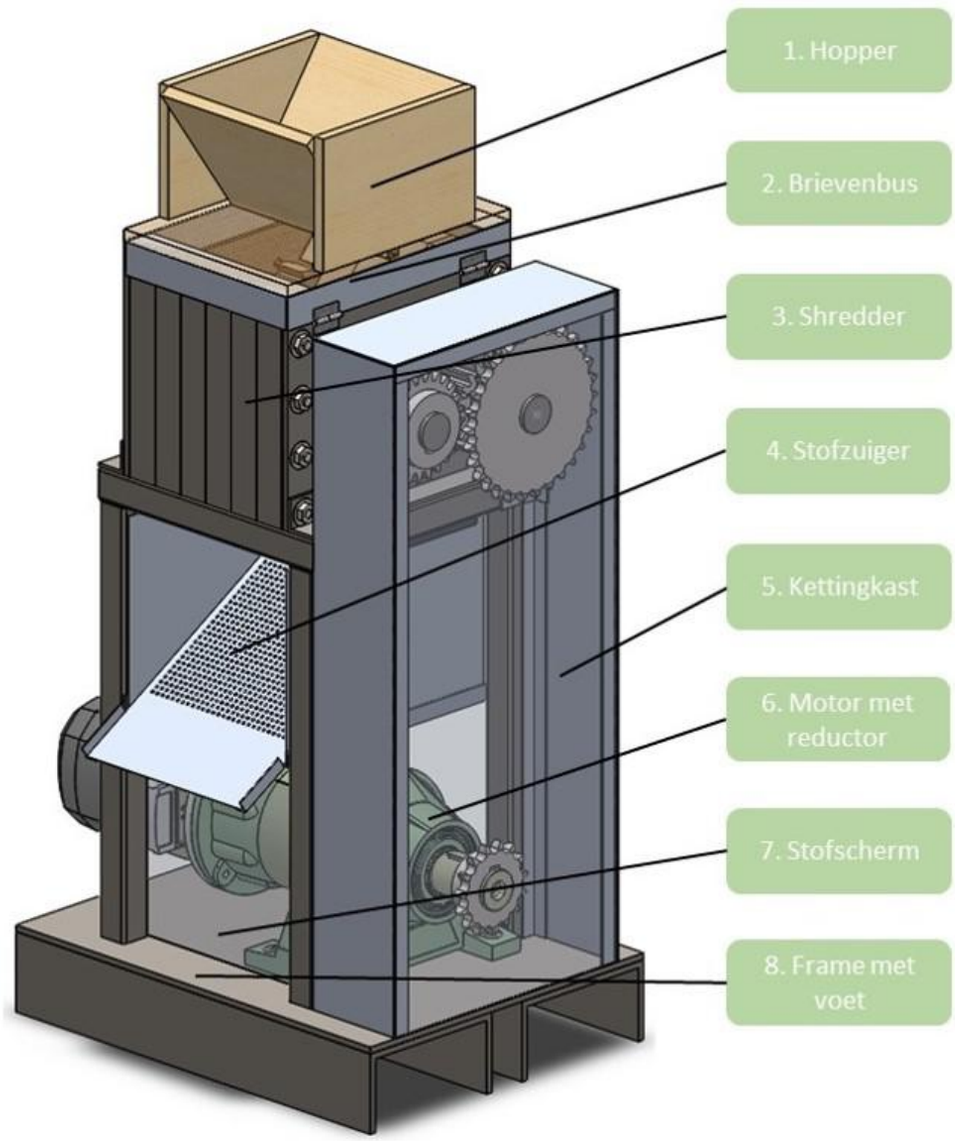
Goede overlap, messen snijden.



Overlap te groot, shredder loopt vast

Figuur 2.12 juiste overlap van messen in shredder

Uit het onderzoek is gekomen dat met de juiste messen de vorm van de vlokken goed te bepalen is. De treksterkte kan voor een groot deel intact worden gelaten. Tijdens het onderzoek is ook gezien dat de vlokken langs de lengterand altijd delamineren. De hoeveelheid delaminatie hangt af van de tussenruimte en de vorm van het mes, niet van de breedte. Met een breder mes (en dus bredere vlok) is er relatief minder delaminatie, waardoor de mechanische eigenschappen beter behouden blijven.



Figuur 2.13: opbouw shredder

Deze shredder is daadwerkelijk gebouwd en getest. Het is gebleken dat op een goede en reproduceerbare manier vlokken van 50 x 150mm te produceren zijn. De hoeveelheid stof die geproduceerd wordt is gering.

De tussentijdse conclusie is dat het mogelijk is om met een shredder composiet te verkleinen in vlokken met de gewenste afmetingen. Het composiet dat wordt verkleind, moet vooraf goed gescreend worden.

Vooruitlopend op de tests die beschreven staan in Hoofdstuk 5 blijkt echter dat de stroken toch door deze manier van shredderen een tegenvallende sterkte-bijdrage geven.

2.6 Sorteren

Voordat het materiaal de shredder ingaat is het van belang te sorteren zodat ongewenst materiaal kan worden verwijderd. Daarnaast moet bepaald worden of het materiaal met een shredder of een hamermolen route kan worden verkleind.

Gezien de bron van het materiaal zullen er altijd ongewenste elementen meekomen. Er zijn echter een aantal redenen te bedenken waarom verschillende materialen ongewenst zijn in het proces. De voornaamste zijn slijtage en werking van de shredder en de eigenschappen van het eindproduct. De hoeveelheid ongewenst materiaal kan groot zijn. Bijvoorbeeld in een batch van composiet uit treinonderdelen was 21,5% van het materiaal daarom niet bruikbaar. Veel voorkomende vervuilingen zijn: metaal, thermoplastische kunststoffen, rubbers en schuimen en hout. In de volgende paragafen wordt beschreven waarom deze materialen uit het composiet moeten worden gefilterd.

Metaal wordt gebruikt voor inserts in composiet en zit vaak in verbindingen. Ook over gebleven bouten, schroeven en allerhande identificatieplaatjes. Het verwijderen van metaal is niet altijd eenvoudig. Vaak zal het verlijmd zitten aan het composiet of verwerkt in het product. Een groot deel van de gebruikte metalen zal ook bestaan uit niet-magnetische varianten zoals RVS of aluminium. Het is de vraag of delen metaal in het eindproduct een sterke negatieve invloed hebben op de initiële eigenschappen. Het is echter wel te verwachten dat een groot verschil in thermische uitzetting en wellicht ook corrosie een gevolg hebben op termijn en daarom is de aanname dat metalen ongewenst zijn in de uiteindelijke mix.

Allerhande thermoplastische kunststoffen worden gebruikt in afwerking en verbonden met het composiet. Daarnaast is ook niet altijd eenvoudig te zien of iets versterkt composiet is, of niet. Het onderscheid is niet altijd eenvoudig te maken. Sommige kunststoffen hebben een dichtheid die significant lager is dan composiet en kunnen dus in een drijf/zink stap gescheiden worden, maar dat haalt niet alles weg. Zeker slecht hechtende kunststoffen, zoals polyethyleen en polypropyleen hebben een nadelige invloed op de eigenschappen van het uiteindelijke product. Daarom is de aanname dat deze ongewenst zijn in de mix. Een mogelijke route is een thermoplastische matrix als bindmiddel. In dat geval zou thermoplastisch materiaal in de mix minder grote problemen moeten geven. Een thermoplastische matrix is in dit project echter niet onderzocht.

Verschillende rubbers, schuimen en elastische kitten worden in grote aantallen gebruikt in de verschillende composiet industrieën. Deze geven geen problemen in de verwerking, maar wel in de eindproducten. In eerste testen is gezien dat bepaalde rubbers na productie onder druk, kunnen gaan expanderen. Daarnaast zijn de eigenschappen natuurlijk ook totaal anders dan van de composiet resten. Het is de verwachting dat een klein deel schuimen en rubbers geen probleem geeft, maar vaststelling van de nog acceptabele hoeveelheid is vooralsnog niet onderzocht.

Hout wordt gebruikt als kernmateriaal en voor verschillende verbindingen. Hout geeft geen problemen in processing. Ook op de korte termijn zijn geen grote issues op de mechanische eigenschappen te verwachten. Op lange termijn kan wel schimmelvorming of rot ontstaan, maar als het hout maar een kleine fractie is, is het effect op de totale constructie waarschijnlijk ook maar zeer klein.

Na het verkleinen is het vooral van belang om de verschillende fracties te onderscheiden. Aangezien het materiaal in principe allemaal vergelijkbare dichtheid heeft, werken scheidingsprincipes op basis van dichtheid niet en zal gekeken moeten worden naar principes die scheiden op grootte. Een aantal mogelijkheden zijn:

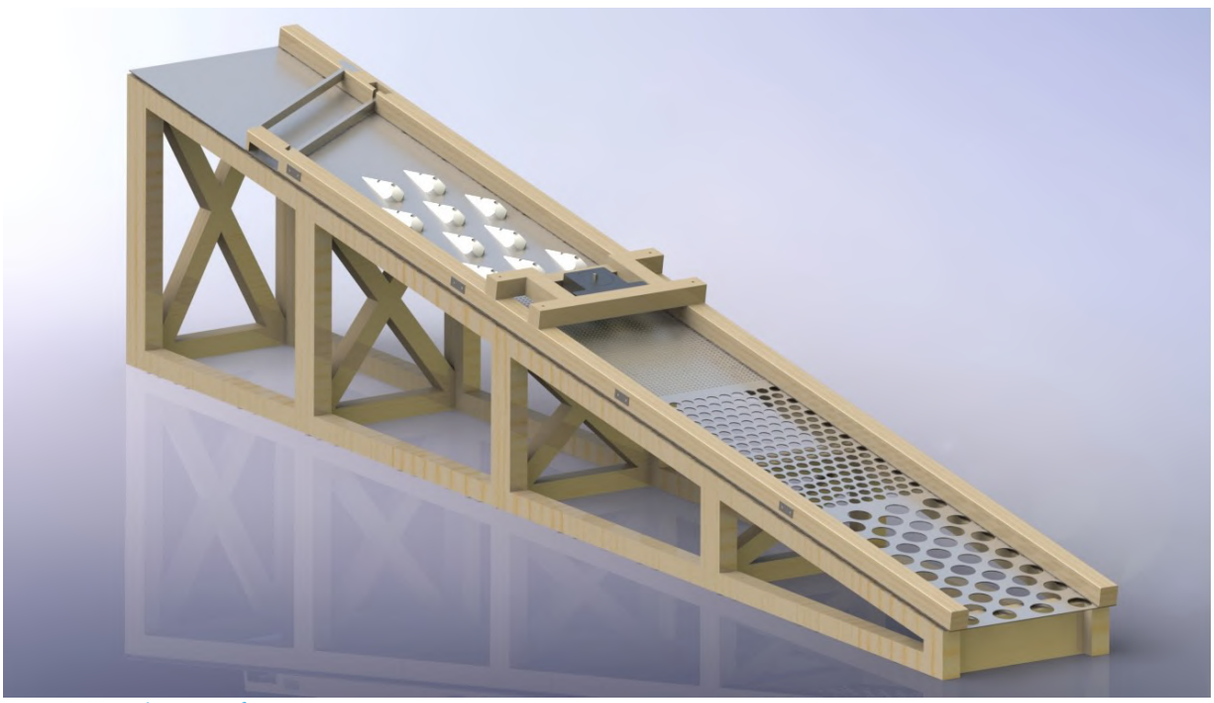
Zeven

Een vlakke plaat met openingen kan gebruikt worden om het materiaal te zeven. Fracties groter dan de gaten in de zeef glijdt erover heen, fracties kleiner vallen door de gaten. Verschillende perforatie groottes zijn achter elkaar te plaatsen, zodat het materiaal in verschillende fracties gescheiden wordt.

Screens
Een ‘starscreen’ of ‘discscreen’ is ontworpen om materialen die in grootte verschillen te sorteren in twee fracties. Een lopende band geeft de ‘starscreen’ een constante aanvoer van materialen. Het proces begint vervolgens op een ‘discscreen’ waar de stervormige schijven roteren in een voorwaartse richting. Hier wordt het materiaal van elkaar afgehaald op een agressieve manier door de schijven die op hoge snelheid ronddraaien. De grove fractie wordt over de ‘starscreen’ heen getransporteerd en valt aan het eind van de ‘screen’. De fijne fracties vallen naar beneden door de ‘screen’ heen.

Trommelzeef
Een trommelzeef wordt vaak gebruikt om te voorsorteren, sorteren en classificeren in diverse fracties. Materiaal wordt toegevoerd in de roterende zeef. In de trommel zeef wordt vervolgens op grootte gefilterd. Materialen die te klein zijn zullen door de zeven heen vallen en afgevoerd worden terwijl grotere delen tot aan het eind van de zeef in de ‘trommel’ blijven.

Proefopstelling
Voor het onderzoek is een trilzeef gebouwd om te onderzoeken hoe de vlokken worden gesorteerd (Grendelman, 2018).



Figuur 2.14: opbouw zeef

Hierbij worden eerst de grootste brokken eruit gehaald voor re-processing, vervolgens wordt het materiaal in lengte richting gesorteerd. Daarna zorgen verschillende zeefplateaus ervoor dat het materiaal in grootte gescheiden wordt van fijn naar grof.
Alhoewel de getoonde opstelling gerealiseerd is, bleek deze nog niet optimaal te werken. Er is echter wel in detail gekeken hoe een fractie materiaal uit de hamermolen opgebouwd is, dus welke fracties te verwachten zijn, wanneer 100% van het materiaal op deze manier verkleind wordt.

2.7 Nabewerken

Na het zeven is het belangrijk dat er (praktisch) geen vocht in het composiet aanwezig is. De hoeveelheid vocht die toelaatbaar is, is afhankelijk van de te gebruiken hars om het composiet te vormen. Als het vochtpercentage te hoog is, moeten de vlokken eerst gedroogd worden zodat het vocht kan verdampen. Tijdens het onderzoek was een batch materiaal die verkleind was door een hamermolen en het vochtpercentage was boven 10% hetgeen de uitharding van het bindmiddel (polyesterhars) zou belemmeren. Nadat het composiet was gedroogd kon het verder worden verwerkt.

Naast het drogen zijn soms ook andere nabewerkingen nodig. Bijvoorbeeld als composiet wordt gebruikt voor industrieel hergebruik, moeten de vlokken in de juiste richting worden gesorteerd.

2.8 Conclusies

Er is in Nederland nog geen systematische inzameling van EoL thermoharde composieten. Er wordt een breed scala aan composiet gebruikt binnen de verschillende economische sectoren in Nederland. Om dit effectief te kunnen verwerken, zou de retourstroom van EoL composiet per sector moeten worden georganiseerd.

Er zijn verschillende verwerkingstechnieken die gebruikt kunnen worden om het composietafval gereed te maken voor hergebruik. De onderzochte activiteiten zijn o.a. het gereed maken voor transport door middel van sloopscharen en watersnijders; het verkleinen van het composiet tot vlokken; het sorteren van het materiaal; het nabewerken, zodat het vocht in het materiaal wordt verminderd. Cruciaal in dit proces is een goede kwaliteitsbewaking bij de verschillende activiteiten. Zo is het belangrijk dat er het composiet verwerkt wordt tot verschillende (gestandaardiseerde) grades met duidelijke eisen voor bijvoorbeeld stof, vet en andere verontreinigingen. Dit is zowel voor de kwaliteit van het eindproduct als de slijtage van de gebruikte machines, zoals een shredder.

Vooruitlopend op de resultaten van Hoofdstuk 5 zal echter toch de manier van het shredderen tot stroken moeten worden verbeterd voor een betere sterkte-bijdrage aan het niet te vervaardigen product.

3. Verwerking tot nieuwe producten

3.1 Evaluatie van mogelijke verwerkingstechnieken

Om het EoL composiet te binden en samenhang te geven tot een (onderdeel van een) nieuw product zal het moeten worden gemengd met een nieuw (virgin) thermohard bindmiddel en vervolgens worden uitgehard. Het nieuwe thermoharde bindmiddel wordt in het vervolg kortweg aangeduid met 'nieuwe hars'. Belangrijke aspecten bij het combineren van de EoL-elementen met de nieuwe hars en de uitharding ervan zijn:

Voldoende benatting van het oppervlak van de EoL-elementen door nieuwe hars
Uitharding van de nieuwe hars
Voldoende hechting tussen EoL-elementen en nieuwe hars
Zo laag mogelijk percentage nieuwe hars
Zo laag mogelijke kosten voor proces en arbeid

Hierbij zijn de eerste drie aspecten technisch van aard, de laatste twee aspecten zijn belangrijk voor de business case (zie ook Hoofdstuk 6).

Met de deelnemers van Werkpakket 2 zijn een aantal discussie-sessies gehouden (zie Appendix 1) om te komen tot de bepaling welke verwerkingstechnieken mogelijk geschikt zijn om aan bovengenoemde aspecten te voldoen. Hierbij zijn diverse technieken beoordeeld voor het verwerken van composieten zoals ook bekend uit overzichtsliteratuur (Nijssen, 2013 en De Moor, 2009). Uit de besprekingen zijn de volgende drie verwerkingstechnieken geselecteerd.

Vacuüm-injectie

Voordeel van deze techniek is dat alle ruimte tussen de EoL-elementen en eventuele nieuwe versterkingslagen en vulmiddelen wordt opgevuld door de nieuwe hars. De benatting is dus optimaal. Nadeel is de beperkte perskracht die werkt op het pakket (in de praktijk maximaal ca. 0,8 bar). Hierdoor zal het percentage nieuwe hars relatief hoog blijven. Bovendien is de voorbereiding van het injectieproces een arbeidsintensief proces.

Perstechniek

Voordeel van deze techniek is dat er een veel hogere druk op het pakket kan worden aangebracht dan bij een vacuüm-techniek. Hiermee kan het percentage nieuwe hars worden verlaagd. Bovendien maakt het gebruik van een gesloten pers met overdruk ook het gebruik mogelijk van een nieuwe hars die opschuimt. Hiermee kan met minder nieuwe hars toch een goede benatting en binding van de EoL-elementen worden bereikt. Nadeel van de techniek is dat er vrij veel arbeid nodig is voor het voorbereiden van de compound, het vullen van de mal, het persen en het lossen van het product. Bovendien is voor het maken van producten van enige omvang een grote pers nodig. Dergelijke persen vergen een grote investering. Ook de maldelen zijn kostbaar: ze moeten sterk zijn om de perskracht te weerstaan en moeten kunnen worden verwarmd.

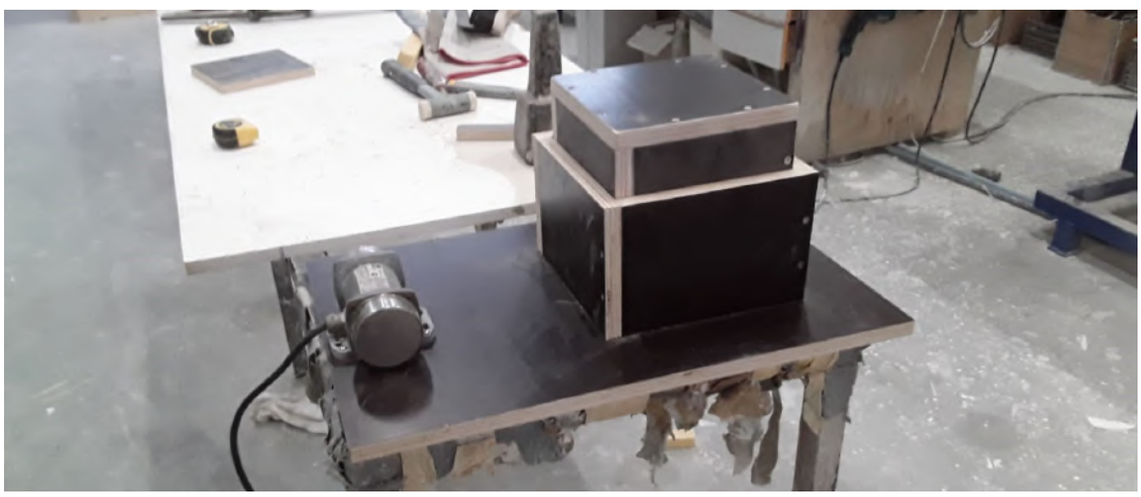
Pultrusie

Het traditionele pultrusie-proces kan worden aangepast om de EoL composietvlokken in het pultrusieproduct te integreren. Bij het hergebruiken van EoL thermoharde composiet wordt een compound gevormd van EoL composietvlokken en nieuwe hars en deze compound wordt voor de pultrusie-mal ingekapseld door de versterkingslagen. Bij een goede afstelling van het harsgehalte in de compound kunnen de nieuwe versterkingsvezels ongeïmpregneerd de compound omsluiten waarna door de perswerking bij het binnentreden in de matrijs de compound wordt uitgeperst en de nieuwe hars de nieuwe vezelversterking impregneert.

Voordeel van deze techniek is dat het een continu en automatisch proces is waarbij de benodigde arbeid minimaal is. Bovendien kan de ingang van de matrijs zo worden vormgegeven met een vernauwing van de holte in het begin dat een zeer hoge persdruk ontstaat op de compound waardoor het gehalte aan nieuwe hars laag kan blijven. Nadeel van de techniek is een grote investering die nodig is om een dergelijke productielijn te installeren.

Deelonderzoek vullingsgraad

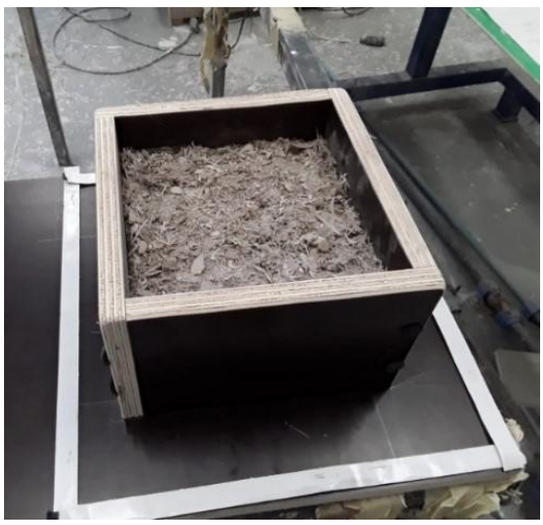
In een deelonderzoek is nagegaan welk vullingspercentage van EoL-elementen in principe mogelijk is. Dit is van belang voor de business-case. Hiertoe is een opstelling gemaakt van een ondermal met een bovenmal die in de bovenmal kan bewegen, zie foto.



Figuur 3.1: Opstelling ondermal met bovenmal

De ondermal wordt gevuld met EoL-elementen en nieuwe versterkingslagen en eventueel zand. De hoeveelheid nieuwe glasvezelversterkingslagen simuleren een opbouw zoals bij de later te bespreken damwandplanken ook is toegepast. De componenten worden vooraf gewogen. Vervolgens wordt de bovenmal geplaatst en wordt het geheel in vacuüm-folie ingepakt en op vacuüm gezet. Hierdoor ontstaat een perskracht. Bovendien wordt afwisselend het vacuüm weer ontlaten en wordt het geheel getrild zodat de compactie beter wordt. Na optimale compactie wordt het geheel geïnjecteerd met nieuwe hars en uitgehard. Door het product vervolgens te wegen kan precies worden bepaald hoeveel nieuwe hars gebruikt is voor het product. Immers het totaalgewicht van het eindproduct minus het gewicht van de droge componenten is het nettogewicht aan nieuwe hars.

De volgende foto's tonen het vullen en het onder vacuüm zetten van de opstelling.




Figuur 3.2 en 3.3: Vacuüm zetten van de opstelling

Er is met deze opstelling een serie van drie tests uitgevoerd om te onderzoeken welke stappen gemaakt kunnen worden in het terugdringen van het gebruik van de nieuwe hars. In de onderstaande tabel worden de resultaten van deze tests weergegeven.

Test	EoL vlokken (in gram)	Nieuwe glasvezel (in gram)	Nieuw zand (in gram)	Nieuwe hars (in gram)	Harspercentage (in gewicht %)
1	1366	112	0	1804	55
2	1366	112	2854	2193	34
3	500	112	1250	792	30

Tabel 3.1: Resultaten van test met nieuwe hars

Belangrijke uitkomsten zijn uit deze drie tests zijn:

- Met alleen EoL-elementen is het gebruik van nieuwe hars in deze opstelling ca. 55% van het totaalgewicht.
- Door het toevoegen van zand kan het gebruik van nieuwe hars teruggebracht worden tot 34% van het totaalgewicht.
- Met een optimalere combinatie van droog zand van EoL vlokken is het gebruik van nieuwe hars verder terug te brengen tot ca. 30% van het totaalgewicht.

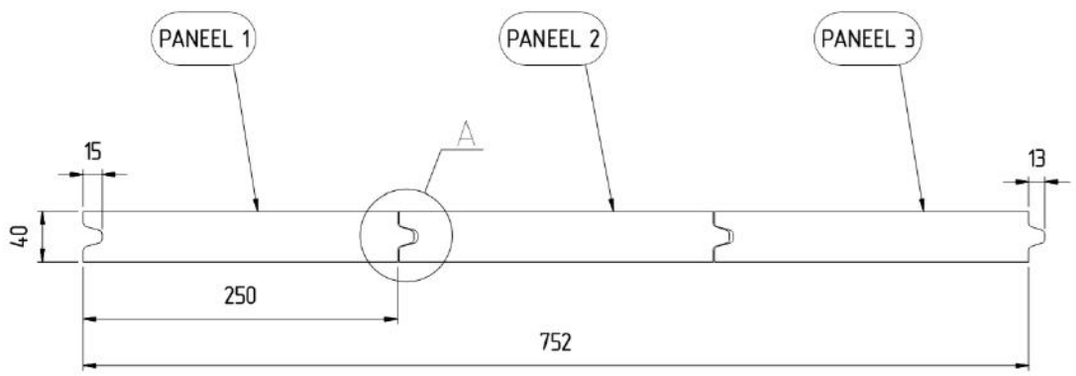
Verder is de verwachting dat de samenstelling en de procedure van compacteren nog verder kan worden geoptimaliseerd waardoor het benodigde percentage nieuwe hars nog lager wordt.

3.2 Vacuüm-injectie

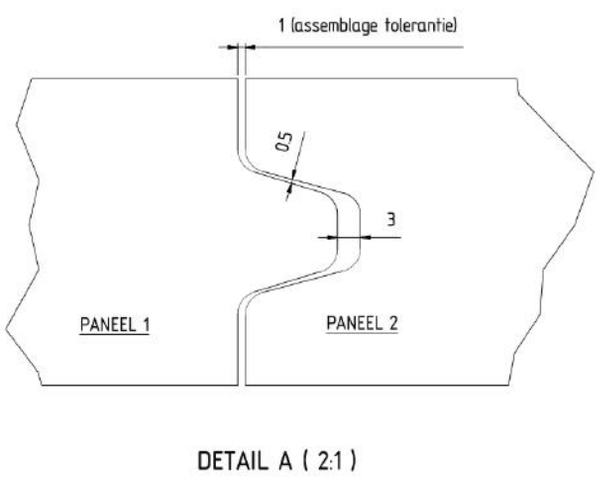
Middels vacuüm-injectie zijn damwandplanken, wrijfgordingen, balken voor een dragline-schot en een draagligger gemaakt. In het volgende worden het productieproces van deze producten kort beschreven en geïllustreerd. In de verslagen waarnaar verwezen wordt en in Appendix 2 van dit rapport staan nadere productiegegevens en foto's van de productiestappen.

Damwandplanken

De opgave was om 80 damwandplanken te maken naar model van het standaard hardhout (azobé) plank met een dikte van 40 mm en een werkende breedte van 250 mm. De plank van hergebruikt EoL composiet moest uitwisselbaar zijn met de hardhouten plank en dus ook voorzien zijn van een messing en groef detaillering. De lengte van de planken moest 3,5 meter zijn. Onderstaande tekeningen tonen de doorsnede details van de planken.

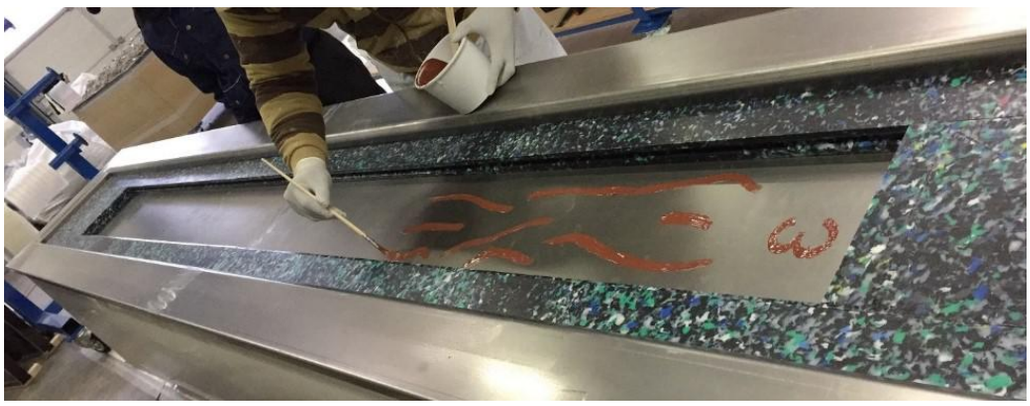


Figuur 3.4: Doorsnede damwandplanken



Figuur 3.5: Doorsnede damwandplanken

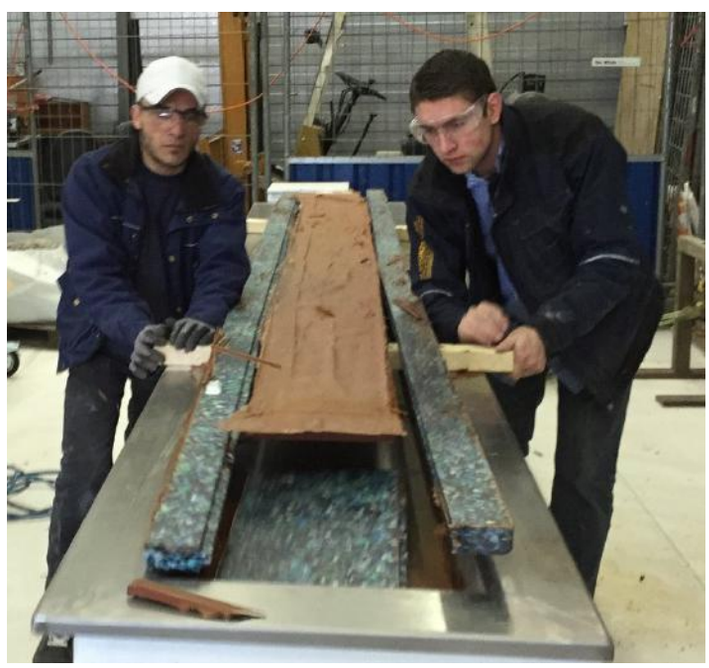
In een tijdelijke productie-inrichting in Lelystad van 100 m2 waren twee stalen mallen opgesteld op rijdbare werktafels met een rijdbare afwerktafel ertussen. Om de messing en groef detaillering te realiseren zijn PE-inzetstukken langs de randen van de mal gelegd. Onderstaande foto toont de stalen mal met inzetstukken en de start van de proces-voorbereiding waarbij met een gelcoat de zichtzijde van de plank wordt voorzien van volgnummer en 'nerven'.



Figuur 3.6: Stalen mal met inzetstukken

De mal werd voorzien glasvezelversterkingen waarin een combinatie van EoL vlokken en stroken werd ingepakt. De details van de opbouw en het proces van inpakken zijn gegeven in het verlag van Guravage (2017). Vervolgens is het geheel luchtdicht afgedicht met een folie, op vacuüm gezet en geïnjecteerd met een bruin gepigmenteerde polyesterhars. De volgende dag kon het uitgeharde product worden gelost en worden afgewerkt. Daarna volgende het schoonmaken van de mal en de inzetstukken als voorbereiding voor het maken een volgende plank. Per mal werd per dag een damwandplank gemaakt. Voor deze manier van produceren waren gemiddeld 3 personen elk ca. 6 uur aan het werk. Dit is omgerekend 9 uur arbeid per plank. De onderstaande foto's tonen een plank na injectie van de hars en het lossen van de plank uit de mal de dag erna. Een uitgebreide reportage van de productie is te vinden in Appendix 2.





Figuur 3.7 en 3.8: Plank na injectie van de hars en het lossen van de plan uit de mal

Van 48 planken uit de totale productie van 80 planken werd het gewicht van de droge componenten en het gewicht van de afgewerkte plank bepaald. Hiermee kan het volgende overzicht worden gemaakt van het gemiddelde gebruik van grondstoffen per plank en de kosten op basis van de netto inkoopprijzen (bedragen zijn exclusief BTW).

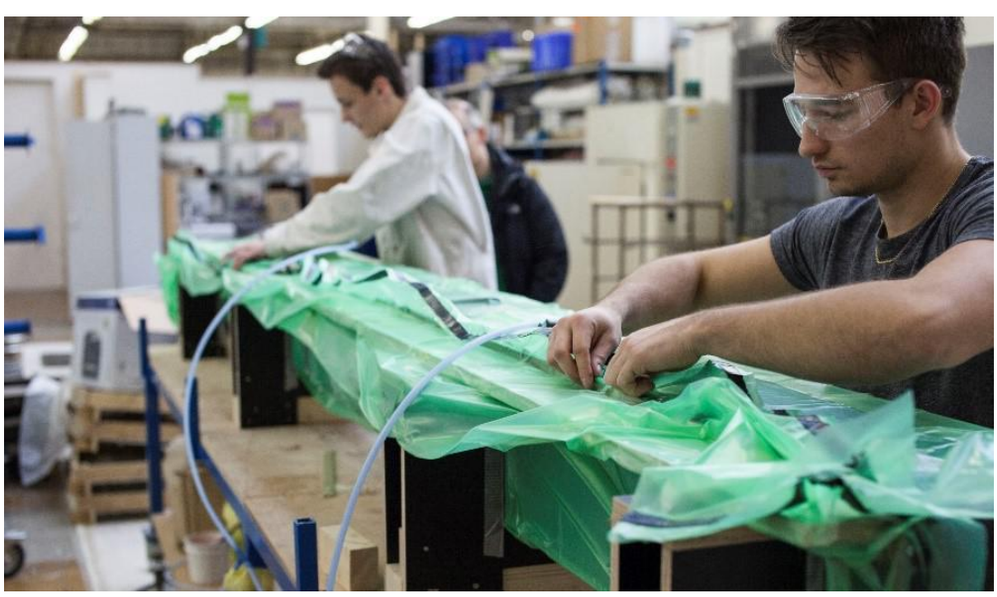
Grondstof	Per plank (kg)	Percentage plankgewicht (%)	Inkoop (€/kg)	Kosten (€)
Vlokken EoL composiet	16,8	34	0 (*)	0,00
Stroken EoL composiet	5,5	11	0 (*)	0,00
Virgin glasversterking	4,9	10	3,66	17,93
Virgin polyesterhars (netto)	22,2	45	2,51	55,72
Gemiddeld plankgewicht	49,4	Totaal aan grondstofkosten per plank		73,65

Tabel 3.2: *) De vlokken zijn gratis ter beschikking gesteld door Demacq Recycling Europe en de stroken zijn gratis ter beschikking gesteld door Bootjessloperij 't Harpje.

Wrijfgordingen

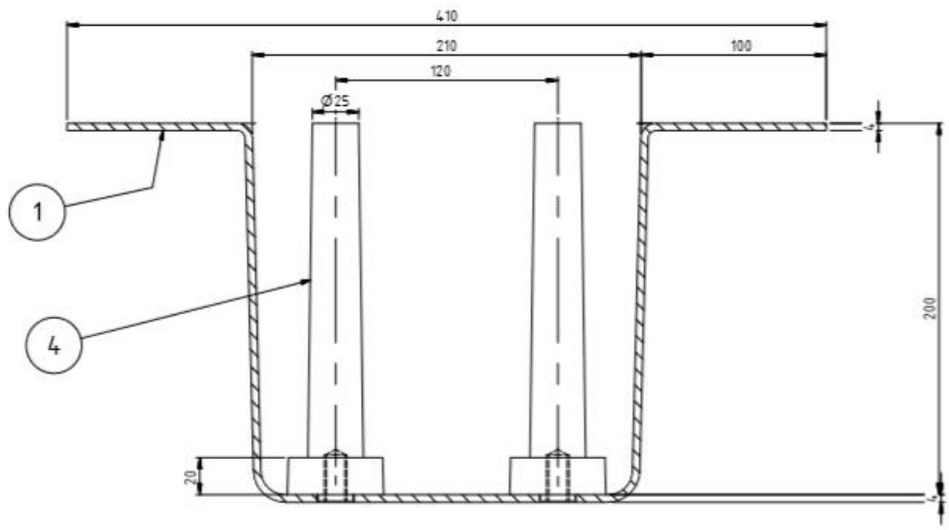
Groningen Seaports heeft Fiby Products in Emmen opdracht gegeven om in totaal 112 meter wrijfgording van hergebruikt composiet te maken voor remmingwerken in Delfzijl. Het zijn balken met een doorsnede van 200 x 200 mm. Van de meeste balken is de lengte 4 meter; een aantal eindbalken hebben een lengte van 2 meter. Als demonstrator voor dit project is gekozen voor een 4 meter lange wrijfgording die een aanvaarbelasting van 44 ton op een overspanning per vak van 1,8 m moet kunnen opvangen (eis aangeleverd door het ingenieursbureau van de Provincie Groningen). Voorafgaand aan deze opdracht moest aangetoond worden dat deze sterkte wordt gehaald. Hiervoor is al demonostrator een prototype testbalk ontwikkeld en getest. Deze demonstrator wordt in Hoofdstuk 4 beschreven. Ter voorbereiding van deze demonstrator is de productie ontwikkeld.

Er is gestart met het maken van testbalken in de werkplaats van Windesheim in een mal van 18 mm betontriplex die luchtdicht werd gemaakt door in te pakken in folie. Op deze wijze zijn twee balken gemaakt en getest bij de TU-Delft op sterkte.



Figuur 3.9: Luchtdicht maken van de mal

Om een hogere compactie te verkrijgen en minder afval (folie en leidingen) is gekozen voor productie middels Resin Transfer Moulding (RTM). Hiervoor is een stalen ontworpen met een composiet bovenmal. Deze mal zou na de demonstratorbalk ook gebruikt gaan worden voor de productie bij Fiby Products. De stalen mal is ontworpen door het ingenieursbureau van Provincie Groningen. Door conische stalen pennen in de ondermal te plaatsen kunnen de benodigde 8 montage-gaten in de balk gelijk mee gevormd worden. De tekening hieronder toont de doorsnede van de mal ter plaatse van een set pennen.



Figuur 3.10: Doorsnede van de mal

De opbouw van de bovenmal met afdichtingen is ontworpen en gemaakt door Composiet Service in Assen. Groningen Seaports heeft geïnvesteerd in het laten maken van deze productiemiddelen en deze ter beschikking gesteld aan Windesheim ten behoeve van het onderzoek en de latere productie door Fiby Products van de wrijfgordingen voor Groningen Seaports. De foto toont de stalen ondermal en in combinatie met de polyester bovenmal.



Figuur 3.11: Foto stalen ondermal en polyester bovenmal

Voorafgaand aan de productie voor de opdracht voor Groningen Seaports is in de RTM-mal de demonstrator testbalk gemaakt om te testen bij de TU-Delft. Deze test wordt beschreven in Hoofdstuk 4 over de demonstrators.

Tijdens de daaropvolgende productie bij Fiby zijn de benodigde arbeid en grondstoffen voor het maken van een wrijfgordingbalk bijgehouden. Per balk werkten 2 personen per dag elk 8 uur. Omgerekend dus 16 manuur per balk. Het gemiddelde gewicht van een 4 meter lange wrijfgording van hergebruikt composiet bedraagt 230 kg. Bijna de helft van dit gewicht bestaat uit nieuwe polyesterhars (gemiddeld 111 kg per balk).

Onderstaande foto's tonen het inpakken van de mal, een geloste balk en de stapel geproduceerde balken voor Groningen Seaports.





Figuur 3.12, 3.13, 3.14: Inpakken van de mal, een geloste balk en geproduceerde balken

Balken voor dragline-schotten

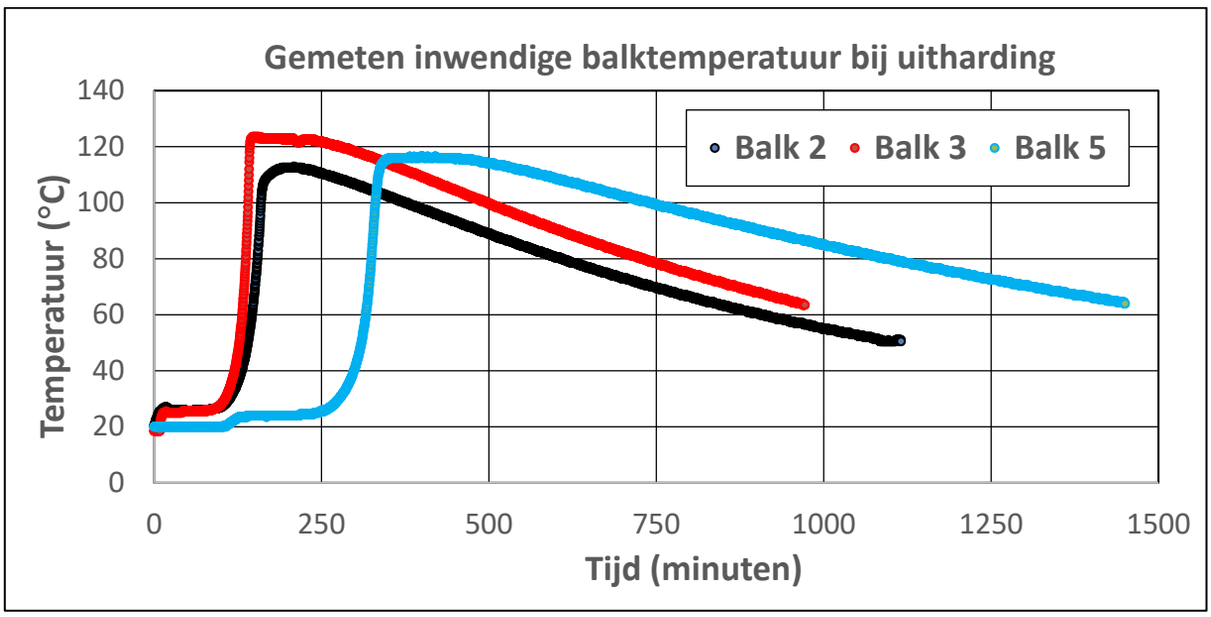
Benodigd waren 5 balken van 200 x 200 x 5000 mm voor het maken van een dragline-schot. Vanwege de lengte was het niet mogelijk de RTM-mal (lengte 4 meter) te gebruiken. Er is gekozen voor het gebruik van een houten mal die met een losse deksel geheel in folie werd gepakt voor de vacuüm-injectie. Door composietbuizen in de mal te plaatsen konden de benodigde 5 doorvoergaten gerealiseerd worden die nodig zijn voor de latere assemblage tot een schot, zie foto's van de malvoorbereiding en injectie. In Appendix 2 staat een uitgebreide beschrijving van de productie.




Figuur 3.15 en 3.16: Malvoorbereiding en injectie

De injectie verliep goed en door de combinatie van relatief fijne EoL composietvlokken en droog zand kon een goede compactie bereikt worden. De gegevens van de productie en foto's van het proces zijn te vinden in het verslag van Jansen (2019) en in Appendix 2.

Tijdens de productie van 3 balken is ook de interne warmteontwikkeling gemeten. Dit is van belang omdat er een grote massa polyesterhars moet uitharden. In overleg met de deelnemende partners is met het oog hierop steeds gekozen voor de combinatie van de voor versnelde Synolite 1967-G-9 hars van Aliancys en 2% Trigonox 249 van Nouryon (voorheen Akzo-Nobel). Het blijkt dat de deze combinatie goed werkt om enerzijds een te hoge exotherme piek te vermijden maar anderzijds een voldoende eerste doorharding van het product te krijgen voor het lossen. Onderstaande curves tonen het verloop van de temperatuur van de kern van de gemeten balken.



Figuur 3.17: Temperatuurverloop kern van de gemeten balken

Afgezien van een horizontale verschuiving van de grafieken door het startmoment van de meting is de vorm van de temperatuur-tijd-curve voor de drie balken vergelijkbaar. De maximale temperatuur in de kern van de balk is rond de 120 °C. Dit is een goede temperatuur: niet te hoog i.v.m. degradatie en niet te laag voor een goede doorharding. De afkoeling van balk 5 is langzamer dan van balk 2 en 3 als gevolg van een hogere omgevingstemperatuur.
Het harsgebruik is in deze producties vrij hoog maar wel steeds vergelijkbaar van balk tot balk. De hoeveelheden gebruikte grondstoffen per balk zijn gegeven in Appendix 2. Onderstaande tabel geeft de componentgewichten- en percentages per balk op basis van het gemiddelde van de vijf balken.

Component	Gewicht (kg)	Gewichtspercentage (%)
Hergebruikt EoL composiet (vlokken)	90,8	31,0
Droog zand (steeds fijn en grof 1:1)	50,0	17,1
Nieuw harsmengsel, netto per balk	118,6	40,5
Glasvezelversterking	33,4	11,4
TOTAAL	**292,8**	**100,0**

Tabel 3.3: Componentgewichten- en percentages

Draagligger

Bij de ontwikkeling van de draagligger is op basis van de ervaringen met de wrijfgordingen onderzocht of de kern van de balk op een samengestelde manier kan worden opgebouwd. Door enerzijds met een dikke laag van het hergebruikte EoL-composiet de buitenste versterkingslagen te laten ondersteunen maar anderzijds in het centrum van de kern schuim toe te passen kan het gebruik van nieuwe hars worden teruggebracht. In een mechanisch rekenmodel is de opbouw geoptimaliseerd ten aanzien van sterkte en minimalisatie van het harsgebruik, zie rapportages van Camping (2019) en Klein en Reza (2019). Dit heeft geleid tot de opbouw zoals te zien is in onderstaande foto (doorsnede gemaakt na de breuktest van de balk).



Figuur 3.18: Doorsnede gemaakt na breuktest

Voor de vervaardiging van de balk is de RTM-mal gebruikt die ook werd gebruikt voor het maken van de wrijfgordingen maar dan zonder de voorvorm-pennen. Gegevens over de productie en foto's van het proces staan in het verslag van Camping (2019). Belangrijke uitkomst is de vermindering die mogelijk is van het gebruik van nieuwe hars (nog zonder gebruik te maken van toegevoegd zand), zie volgende tabel.

Component	Gewicht (kg)	Gewichtspercentage (%)
Hergebruikt EoL composiet (vlokken)	55,10	29,8
Nieuwe hars (Synolite 1967-G-9)	91,80	49,6
UD-glasversterking (legsel 840 g/m^2)	15,25	8,3
Quadraxiaal glasversterking (legsel 1200 g/m^2)	19,85	10,7
Injectiemat (900 g/m^2)	2,40	1,3
PET-schuim (80 kg/m^3)	0,55	0,3
TOTAAL	**184,95**	**100,0**

Tabel 3.4: Gebruik van nieuwe hars

3.3 Perstechniek

Voor het persen van platen met vlokken EoL composiet is een compound ontwikkeld met een schuimende polyurethaan-hars (PU). Door twee componenten te mengen (polyool en isocyanaat) ontstaat in enkele minuten een PU-schuim. Een dergelijke hars is uiteraard niet met een vacuüm-techniek te gebruiken maar wel met een perstechniek. Verder heeft PU goede hechtingseigenschappen met EoL composiet. Doordat de hars schuimt worden de ruimtes tussen de op elkaar geperste vlokken opgevuld en wordt bereikt dat er relatief weinig hars wordt gebruikt.

De verwerkingstijd van PU-schuim is beperkt omdat na het mengen van de componenten de schuimvorming en de uitharding vrij snel begint. In overleg met de leverancier Romar Voss is daarom gekozen voor Purschuim HR, waarbij de schuimvorming start ca. 1 minuut na het mengen en de uithardingstijd ca. 9 minuten bedraagt. Bij onbelemmerde schuimvorming ontstaat een PU-schuim met een dichtheid van ca. 40 kg/m^3.

In een vooronderzoek is de mengverhouding onderzocht van vlokken en PU-mengsel die zijn verwerkt tot een vlakke plaat van ca. 18 mm. Bij een deel van de tests werden de vlokken gezeefd om de stoffractie te verwijderen. Van de platen werden proefstaven gemaakt waarmee de E-modulus en de buigsterkte werden bepaald met een driepunts-buigproef. Een aantal resultaten staan in onderstaande tabel. Ter vergelijk staan ook de mechanische eigenschappen van een hout-gebaseerde OSB-plaat (type OSB/2, Centrum Hout 2011) vermeld.

Vlokken (g)	PU-mengsel (g)	Gewichtsverhouding Vlokken (%) : PU-mengsel (%)	E-modulus (GPa)	Sterkte (MPa)
755 (gezeefd)	270	74 : 26	3,8	38
756 (niet-gezeefd)	260	74 : 26	5,6	56
800 (niet-gezeefd)	200	80 : 20	4,4	43
850 (niet-gezeefd)	156	84 : 16	5,4	46
750 (gezeefd)	100	88 : 12	5,0	28
OSB/2 (hout)	NVT	NVT	3,8	9

Tabel 3.5: Doorsnede damwandplanken

Tijdens de verwerking blijkt dat de aanwezigheid van stof het mengproces bemoeilijkt voor een grootschalige verwerking wordt de benodigde mengtijd te lang. Met gezeefde vlokken waar het fijnste stof is verwijderd gaat het mengproces sneller.
Boven een verhouding van 90% vlokken en 10% PU-schuim wordt de samenhang minder en blijven er droge plekken in het product omdat niet helemaal vol schuimt.

Voor het vervaardigen van platen voor de demonstrator (zie Hoofdstuk 4) wordt gekozen om te werken met gezeefde vlokken en een gewichtsverhouding van 75% vlokken en 25% PU-schuim.

In samenwerking met partner VDL-Wientjes in Emmen is het persen van 18 mm platen gerealiseerd. Ter beschikking stond een SMC-pers (sluitkracht 2000 ton) voorzien van twee stalen vlakke maldelen van 920 x 2740 mm die verwarmd kunnen worden. Door gebruik te maken van een rondlopende afsteunrand van 18 mm hoogte wordt gerealiseerd dat het compoundpakket (vlokken en schuimende hars) tot een constante hoogte werd afgeperst. De onderste matrijshelft werd niet verwarmd en de bovenste matrijshelft was verwarmd tot een temperatuur van 110 °C, waardoor het product na het sluiten van de mal goed kon doorharden. De foto onder toont de pers voordat deze gaat sluiten.



Figuur 3.19: Sluitende pers

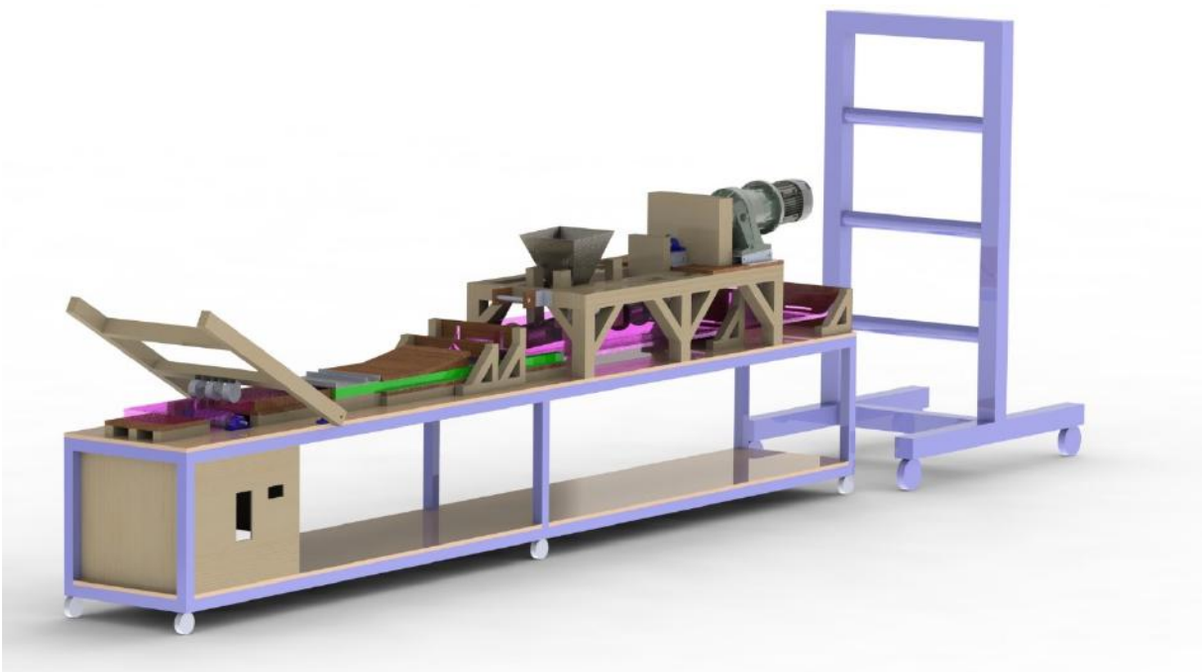
Per perscyclus werd 55 kg compound van vlokken (75%) en PU (25%) gebruikt. Na het lossen komt een OSB-achtige plaat tevoorschijn. Echter, het oppervlak is vrij ruw. Voor bouwtoepassingen is dit acceptabel maar voor interieur-toepassingen is een nabehandeling nodig met een vullende, transparante coating.



Figuur 3.20 Doorsnede plaat met transparante toplaag

3.4 Pultrusie

Om de mogelijkheden van pultrusie te onderzoeken is een prototype pultrusielijn gebouwd. Na vooronderzoek en voortests is een opstelling ontworpen, zie impressietekening.



Figuur 3.21: Prototype pultrusielijn

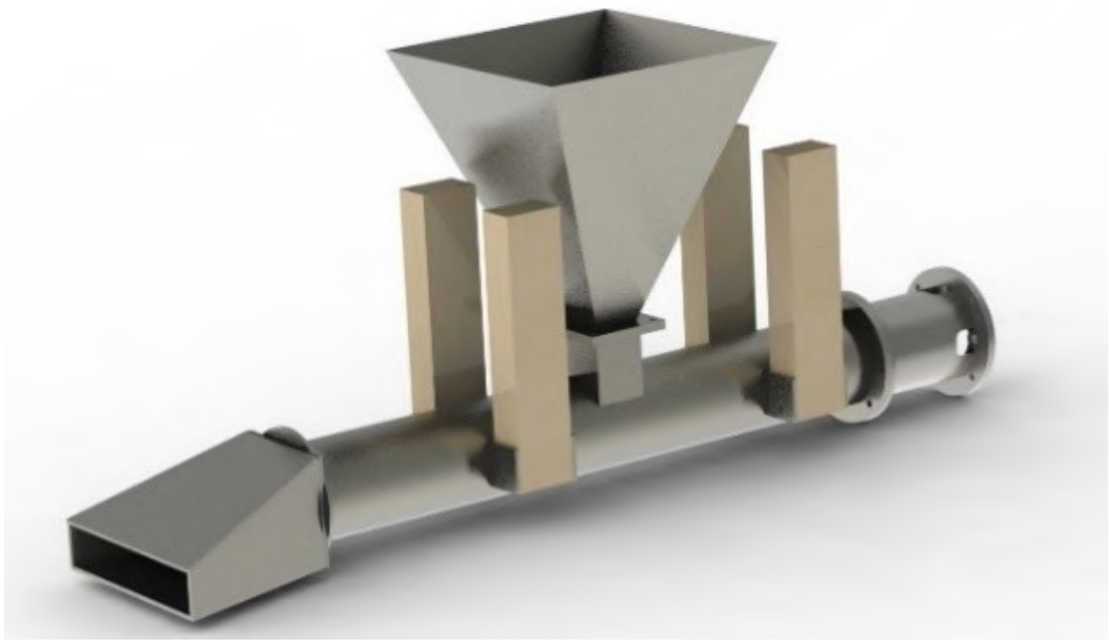
Vanuit de rollenkar worden de versterkingslagen aangevoerd naar de opstelling om daar vervolgens voorgevormd te worden. De buitenmantel van de versterking wordt gevormd door een 630 mm brede glasvezel-injectiemat van 900 g/m^2. Direct hierop komt een 200 mm brede UD-legsel-strook van 840 g/m^2. Pas na het aanbrengen van de compound van vlokken en hars op dit pakket wordt een tweede UD-legsel-strook met dezelfde eigenschappen aangebracht. De foto's tonen de eerste twee versterkingslagen vanaf de rollenkar.





Figuur 3.22 en 3.23: Twee versterkingslagen vanaf de rollenkar

Om de compound van fijne vlokken en hars op de eerste versterkingslagen aan te brengen is een gemotoriseerde wormschroef ontwerpen en gerealiseerd, zie onderstaande figuren.



Figuur 3.24: Wormschroef en versterkingslagen



Figuur 3.25: Wormschroef en versterkingslagen

Door het glasvezelversterkingspakket voor te vormen maar nog niet te sluiten ontstaat een opening waar de wormpers de compound tussen de lagen kan persen, waarna de tweede UD-legselstrook van boven wordt aangebracht en het versterkingspakket verder gesloten kan worden voordat deze in het matrijsgedeelte komt, zie foto.



Figuur 3.26: Wormpers in werking

Omdat er voor de prototype-opstelling niet een sterke puller beschikbaar was en de matrijs uit hout was opgebouwd moesten te grote wrijvingskrachten vermeden worden. Om die reden liep een folie rondom het pakket van versterkingslagen en compound mee om gemakkelijker door de matrijs te kunnen schuiven.

Er werd gebruik gemaakt van een koud hardende polyester waarvan de potlife werd verlengd met een vertrager om voldoende verwerkingstijd te hebben. Met een verwarmingselement van 60 °C kon de houten matrijs voldoende worden opgewarmd om met een lage loopsnelheid (40 mm per minuut) de polyester in de matrijs te laten uitharden.

De volgende foto toont de gehele opstelling. De groene kleur toont de folie die rondom het product is gewikkeld om de wrijving van het proces te verminderen. Het proces kreeg de naam ‘push-pultrusie’ omdat de compound voor de matrijs in het glasvezelpakket wordt gedrukt. De foto toont de opstelling.



Figuur 3.27: Opstelling

Het proces was in staat om met een continue, lage snelheid (40 mm/min) een uitgeharde damwandplank te produceren. Details van de test en foto's zijn gegeven in het verslag van Garcia Villamor (2018). Verder zijn uitgebreide analyses en het ontwerp van de opstelling te vinden in de verslagen van Garcia Villamor en de minor-groep van de minor Production, Kiers, Kalthof en Op 't Ende (2019).



Figuur 3.28: Foto doorsnede van twee profielen

4. Toepassingen: demonstrators

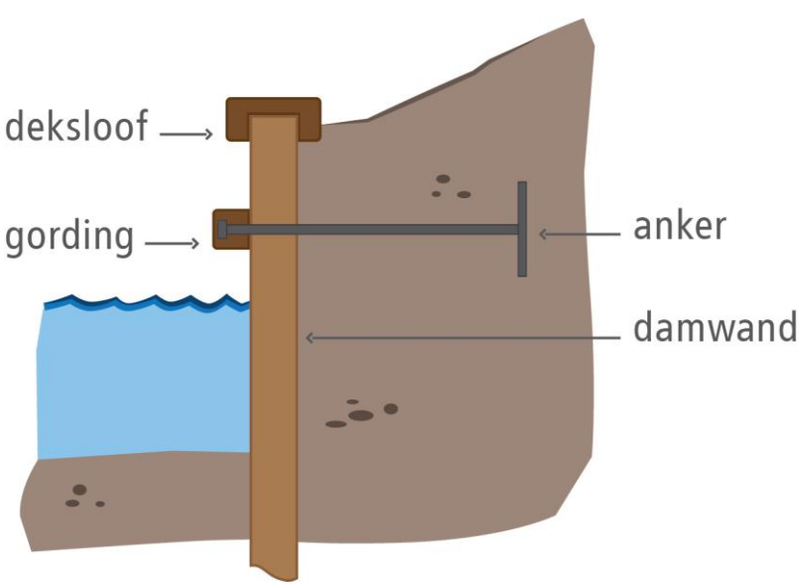
4.1 Oeverbeschoeiing

Bij waterwegen wordt vaak een oeverbeschoeiing aangelegd om een verticaal deel in de oever te realiseren. De hoogte bepaalt hoeveel de oeverbeschoeiing moet keren. Hoe groter de kerende hoogte, hoe sterker de oeverbeschoeiing moet zijn om de gronddruk te weerstaan. Uiteraard speelt de grondsoort (zand, veen of klei) hierbij ook een rol. Bij kleine kerende hoogtes in de orde van enkele decimeters volstaan zogenaamde paal-schot-beschoeiingen van hout of een combinatie van hout met kunststof. Bij middelgrote kerende hoogtes tot ca. 2 meter (zoals in kanalen en kleine havens) worden meestal hardhouten planken met een messing-groef-detaillering in de grond getrild. Bij grote kerende hoogtes boven de 2 meter worden in de regel stalen damwanden met een 'klauw-verbinding' verticaal in de grond getrild. Het onderzoek richt zich op de middelgrote kerende hoogtes omdat dat 1) daarbij de gebruikte materialen een hoger prijsniveau hebben dan bijvoorbeeld bij de kleine kerende hoogtes (gunstig voor de business case) en 2) de technische haalbaarheid veel zekerder is dan bij de hoge kerende hoogtes. Bovendien wordt de middelgrote oeverbeschoeiing in Nederland veel toegepast dus is er ook een afzetmarkt.



Figuur 4.1: Damwandplanken

Het principe van een beschoeiing voor een middelgrote kerende hoogte is weergegeven in de onderstaande figuur waarin de doorsnede getoond wordt van een oever met daarin de verticale wand getekend die is opgebouwd met planken met een messing-groef-detaillering.



Figuur 4.2: Dwarsdoorsnede damwandplank



Figuur 4.3: Damwand planken

Afhankelijk van de gronddruk kan de damwand ook voorzien worden van een horizontale balk (een gording) die verankerd is in de grond. De bovenzijde wordt meestal afgewerkt met een zogenaamde deksloof die op verschillende manieren kan worden uitgevoerd. In het algemeen is de planklengte zodanig dat de kerende hoogte van de grond een derde is van de totale planklengte, dus twee derde van de plank zit meestal volledig in de grond.

Intrillen testplank

Aan het begin van de productie van de oeverbeschoeiingsplanken zijn drie planken genomen voor een praktijktest. Het doel van deze test was om te zien hoe de hergebruikt composiet planken zich zouden houden bij het intrillen in de grond. De test is uitgevoerd bij De Wilde in Lelystad, onderdeel van de Reimert Groep.

Uit de test is gebleken dat de hergebruikt composiet planken op dezelfde manier in te trillen zijn als de hardhouten planken. Aan de bovenzijde van de hergebruikt composiet planken was nauwelijks schade zichtbaar door het trilblok. De resultaten van deze test gaven het vertrouwen dat de planken zich zonder problemen en schades zouden laten intrillen op de testlocatie.



Figuur 4.4: Intrillen composietplanken

Plaatsen van de planken Beatrixsluis Almere

Waterschap Zuiderzeeland heeft een locatie ter beschikking gesteld die gebruikt kon worden als testlocatie voor de hergebruikt composiet oeverbeschoeiingsplanken. De aangewezen locatie is bij de Beatrixsluis in Almere. Deze sluis zorgt voor een verbinding tussen de Noorderplassen en de Koning Willem-Alexanderwetering. Bij deze sluis waren de oevers aan de zijde van de Noorderplassen aflopend en hier moest een oeverbeschoeiing geplaatst worden. Er is gekozen om hier beschoeiing van hergebruikt composiet te plaatsen. De plaats van de oeverbeschoeiing is met een rode lijn aangegeven op de foto onder aan de pagina. Het plaatsen van de oeverbeschoeiing is gedaan door Reimert Bouw en Infra.



Figuur 4.5: Plaatsen oeverbeschoeiing



Figuur 4.6: Overzichtsfoto

Tusseninspectie

Een jaar na het plaatsen van de oeverbeschoeiing is er op locatie een visuele inspectie gedaan. Rondom de waterlijn is op het oppervlak van de planken wat groene aanslag zichtbaar. Op de foto's hieronder is te zien dat de planken niet verkleuren. De bovenbalk is van hardhout die als deksloof fungeert is vergrijsd. De planken van hergebruikt composiet hebben hun originele bruine kleur behouden.



Figuur 4.7: Oeverbeschoeiing



Figuur 4.8: Oeverbeschoeiing

Testen planken voor en na 2 jaar gebruik

Tijdens de productie van de oeverbeschoeiingsplanken is reeds een aantal planken getest op buiging. Een uitgebreide beschrijving van deze testen wordt gegevens door Sam Guravage (2017). Tijdens deze testen is met maximale breukmoment en de breukspanning van de composieten oeverbeschoeiing en van de hardhouten oeverbeschoeiing bepaald.

Na twee jaar gebruik als oeverbeschoeiing is onderzocht welke invloed het gebruik heeft op de eigenschappen van de plank. Hierbij kan een vergelijk gemaakt worden met de testen die eerder zijn uitgevoerd.

Na twee jaar in het water te hebben gestaan zijn er, in samenwerking met waterschap Zuiderzeeland en Reimert Bouw en Infra, twee planken uit de beschoeiing gehaald. Hiervoor zijn twee nieuwe composietplanken, die nog over waren van de productie, terug geplaatst. De twee gebruikte planken zijn elk in drie stukken van 1 meter gezaagd en vervolgens getest op buiging middels een 3-punts buigproef. Alle testen zijn uitgevoerd met een oplegafstand van 800 mm.

In onderstaande tabel staan de resultaten van de buigtesten weergegeven.

Proefstuk	Doorsnede	Breukmoment	Spanning
Azobe 1	270 x 39 mm	8700 Nm	128 MPa
Azobe 2	270 x 39 mm	6780 Nm	99 MPa
Nieuw composiet 1	250 x 44 mm	7700 Nm	95 MPa
Nieuw composiet 2	250 x 44 mm	7640 Nm	95 MPa
Nieuw composiet 3	250 x 44 mm	8380 Nm	104 MPa
Nieuw composiet 4	250 x 44 mm	9220 Nm	114 MPa
Gebruikt composiet 1	250 x 42 mm	6800 Nm	93 MPa
Gebruikt composiet 2	250 x 42 mm	9000 Nm	122 MPa
Gebruikt composiet 3	250 x 42 mm	5900 Nm	80 MPa
Gebruikt composiet 4	250 x 36 mm	6520 Nm	121 MPa
Gebruikt composiet 5	250 x 36 mm	5040 Nm	93 MPa
Gebruikt composiet 6	250 x 36 mm	6400 Nm	118 MPa

Tabel 4.1: Resultaten buigtesten

Van elk getest proefstuk is het breukmoment bepaald. Het gemiddelde breukmoment van de Azobeplanken is 7740 Nm. Het gemiddelde breukmoment van de nieuwe composietplanken is 8235 Nm en het gemiddelde van de gebruikte planken is 6610 Nm.
Het lagere gemiddelde breukmoment van de gebruikte composietplanken komt door het verschil in dikte ten opzichte van de nieuwe composietplanken. De nieuwe composietplanken hebben een gemiddelde dikte van 44 mm terwijl de geteste gebruikte composietplanken een gemiddelde dikte hebben van 42 en 36 mm.

Om het verschil in dikte te verrekenen kan de breukspanning bepaald worden. Omdat de planken een niet uniforme doorsnede hebben en opgebouwd zijn uit materialen met onbekende eigenschappen is dit praktisch onuitvoerbaar. Daarom is gekozen om als sterk vereenvoudigde methode de een gemiddelde spanning te bepalen met $\sigma = M/W$, waarbij bij de bepaling van het weerstandsmoment de gemiddelde dikte is gebruikt. Dit is bij alle geteste planken gedaan. De berekende spanningen staan weergegeven in de tabel. De spanning voor nieuw composiet is gemiddeld 102 MPa en voor gebruikt composiet is de spanning 104 MPa. Hieruit blijkt dat de planken na twee jaar te zijn toegepast als oeverbeschoeiing niet hebben ingeboet op sterkte.



Figuur 4.9: Testopstelling buigtest



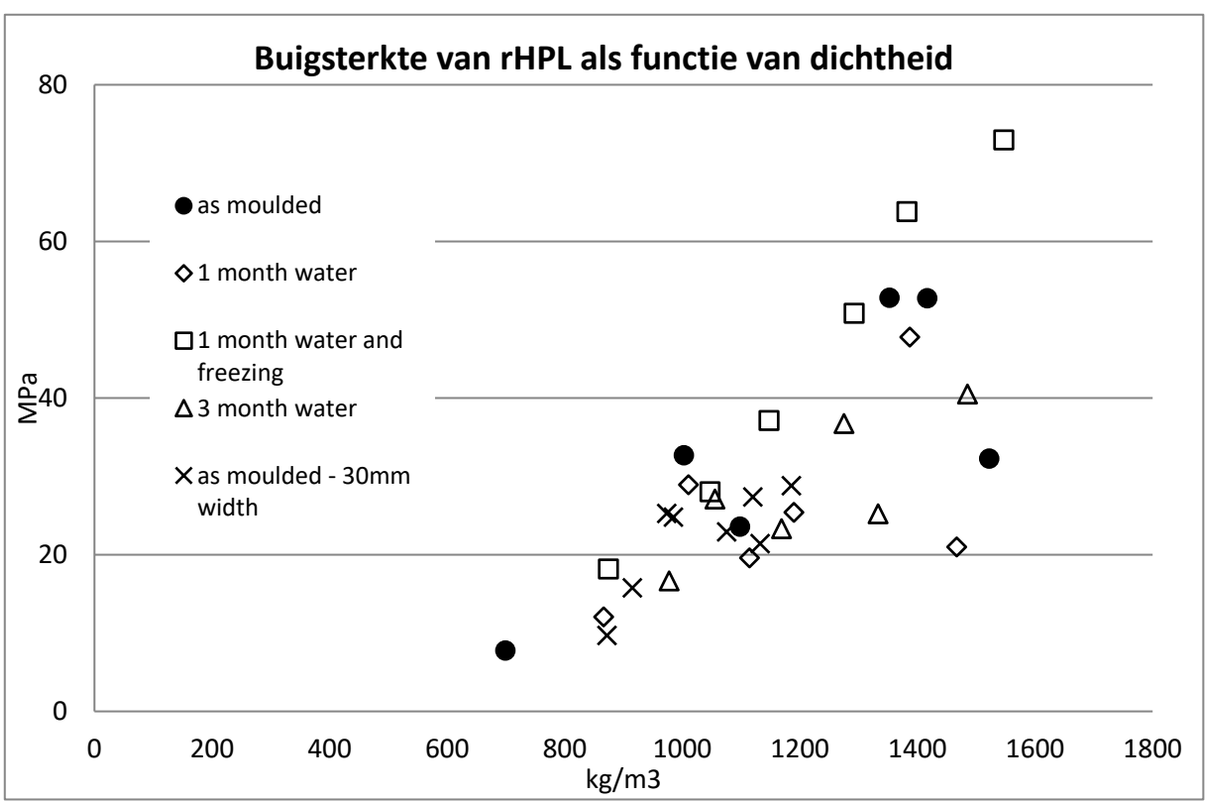
Figuur 4.10: Vervangen planken

Bij het vervangen van de twee planken zijn tevens de overige planken geïnspecteerd. Ten opzichte de inspectie na één jaar plaatsing was op de waterlijn extra groene aanslag zichtbaar. Verder zijn er tijdens de inspectie geen verschillen waargenomen ten opzichte van een jaar terug.

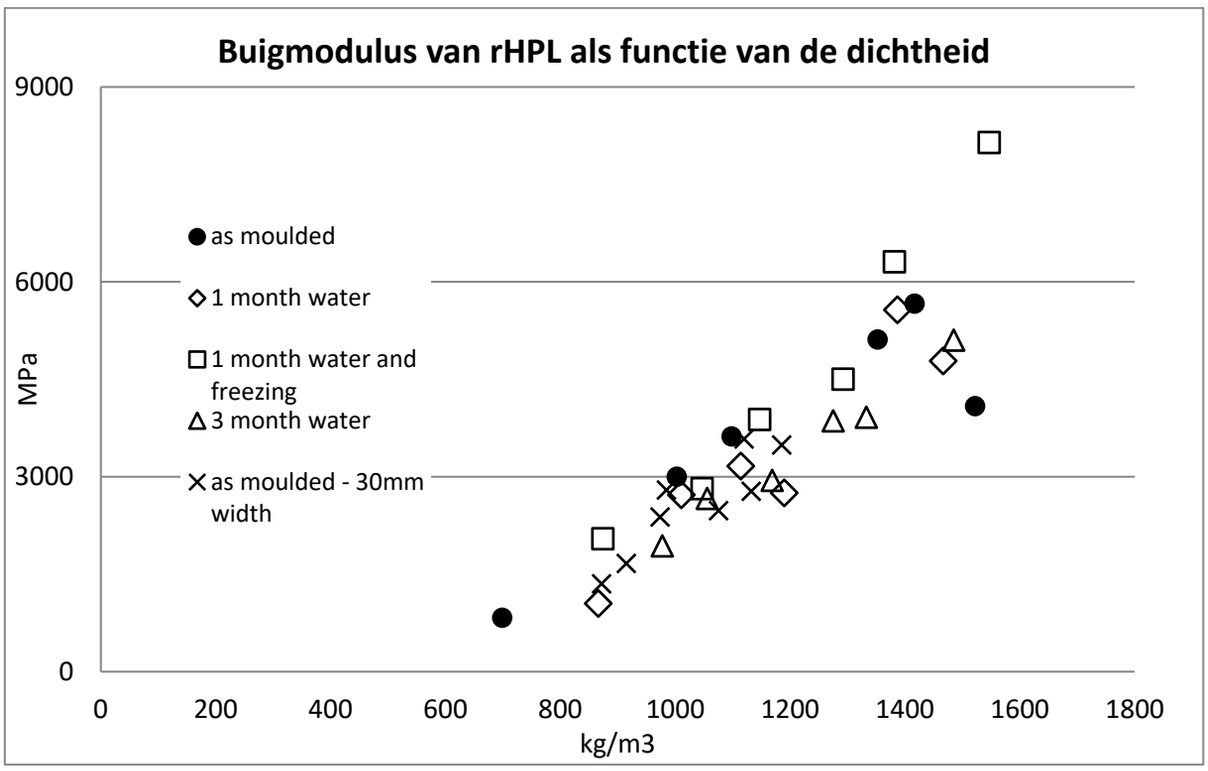
4.2 rHPL-panelen

4.2.1 Testen

Uit de geproduceerde rHPL platen zijn op diverse plaatsen uit verschillende platen testsamples gezaagd om te testen op mechanische eigenschappen. De vervaardiging van de panelen is beschreven in Hoofdstuk 3. Omdat het mengsel niet homogeen is, is van elk van de samples de dichtheid bepaald door de afmetingen van de samples te bepalen en de samples te wegen. Dit is gedaan om de mechanische eigenschappen te kunnen relateren aan de dichtheid. In totaal zijn 24 samples gezaagd van 360x60x18mm (lxbxh) en deze samples zijn verdeeld in 4 groepen van 6 samples. De groep 'As moulded' is getest zonder dat het sample is blootgesteld aan invloeden van buitenaf. De groep '1 Month water' is getest nadat de samples 1 maand ondergedompeld zijn in water (bij kamertemperatuur). De groep '1 Month water and freezing' is getest nadat de samples 1 maand ondergedompeld zijn in water en vervolgens 24 uur zijn bewaard bij -18°C. De groep '3 Month water' is getest nadat de samples 3 maanden zijn ondergedompeld in water. De groep 'As moulded – 30mm width' is een groep van 8 samples van 360x30x18mm en deze groep is getest zonder dat de samples zijn blootgesteld aan invloeden van buitenaf. Elke groep had een evenwichtige verdeling van de dichtheid tussen de samples. Hieronder staat een grafiek van de buigsterkte en een grafiek van de buigmodulus, steeds als functie van dichtheid.



Figuur 4.11: Buigsterkte rHPL



Figuur 4.12: Buigmodulus rHPL

Beide grafieken laten eenzelfde beeld zien: naarmate de dichtheid toeneemt, nemen ook de sterkte en stijfheid toe. De mechanische eigenschappen worden namelijk voornamelijk bepaald door het vershredderde composiet. Het vershredderd composiet heeft een hogere dichtheid (ca. 1600 kg/m^3) dan het PU-schuim (ca. 45 kg/m^3).

Onderdompeling in een waterbad voor één maand met of zonder 24 uur vriezen en 3 maanden onderdompeling in water hebben geen significante invloed op de sterkte noch op de stijfheid.



Figuur 4.13: Shredderfractie

De spreiding van de meetresultaten is bij de sterkte groter dan bij de stijfheid. Een verklaring hiervoor is dat bij de sterkte onder andere de grootte, vorm en oriëntatie van het vershredderd composiet van belang zijn. De gebruikte fractie had een grote variatie in vorm en grootte van de vlokken. De grote variatie in de gebruikte vlokken is inherent aan de gebruikte shreddertechniek voor deze batch. De foto geeft een beeld van de gebruikte fractie. Tijdens het productieproces zijn de vlokken niet georiënteerd en liggen dus random door de plaat.

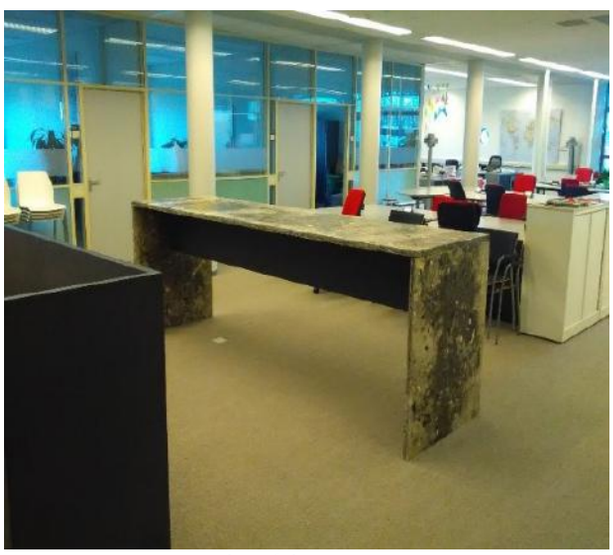
4.2.2 Meubels

Tijdens het ontwerpen van een nieuw interieur voor het T-gebouw van hogeschool Windesheim werd interieurarchitect Maartje van den Berg van Blossom Architecture erg enthousiast over de look and feel van het rHPL materiaal. Er deed zich de mogelijkheid voor om een deel van de nieuwe meubelen op te bouwen uit de rHPL platen. Na een aantal proeven bij VDL Wientjes in Emmen is ongeveer 80 m^2 plaatmateriaal hiervoor geperst. De productie staat beschreven in Hoofdstuk 3. Alle benodigde panelen voor de diverse meubelen zijn gesneden met behulp van een waterstraalsnijmachine bij de firma Becker in Hardenberg. Nadat de panelen gesneden waren zijn de panelen voorzien van een transparante coating. Met de afgewerkte panelen heeft de interieurbouwer, IBP-interieurbouw, de meubelen geassembleerd en geplaatst in het T-gebouw op de verdiepingen T0 (begane grond), T1 en T3.

De rHPL panelen zijn verwerkt in diverse meubels: twee sta/vergadertafels, drie tafels voor studentenwerkplekken, twee keukenblokjes, twee pantrymeubelen en een grote en een kleine lockerkast. De onderstaande foto's geven de diverse meubels en hun locaties weer.



Figuur 4.14: Tafel bij studentenwerkplek op T1



Figuur 4.15: Sta/vergadertafel op T3



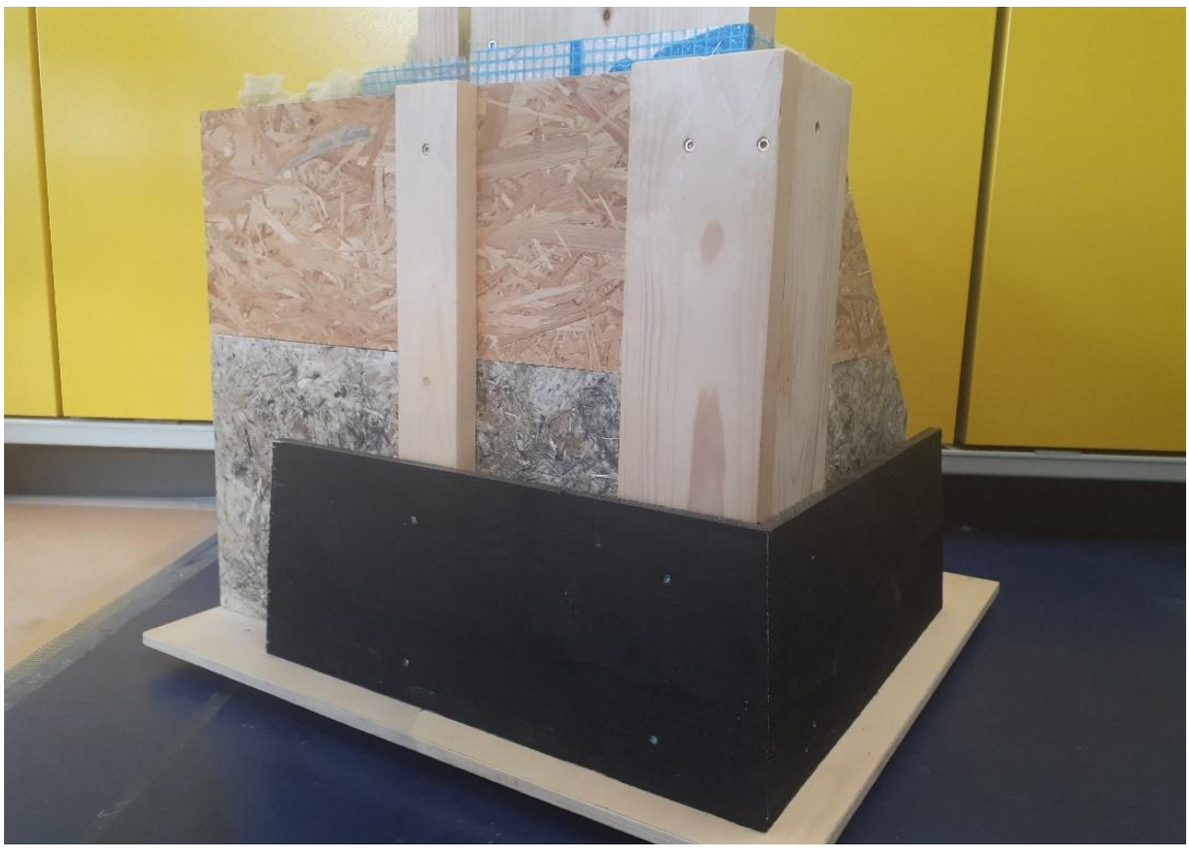
Figuur 4.16: Keukenblok en pantrykast op T1/T3



Figuur 4.17: Lockerkast op T1

4.2.3 Demonstrator voor bouwtoepassing

Naast de toepassing als interieurpaneel is rHPL ook geschikt als vervanger voor OSB-plaatmateriaal. OSB wordt veel toegepast in houtskeletbouw (HSB) woningen en heeft als groot nadeel dat het gevoelig is voor inwerking van vocht. rHPL is ongevoelig voor vocht en kan daarom worden toegepast waar de grootste inwerking van vocht plaats vindt, namelijk het onderste deel van de betimmering. rHPL laat zich eenvoudig bewerken met een diamantzaag en kan net als OSB geschroefd worden mits de gaten voorgeboord worden.



Figuur 4.18: demonstrator hoekdetail houtskeletbouw

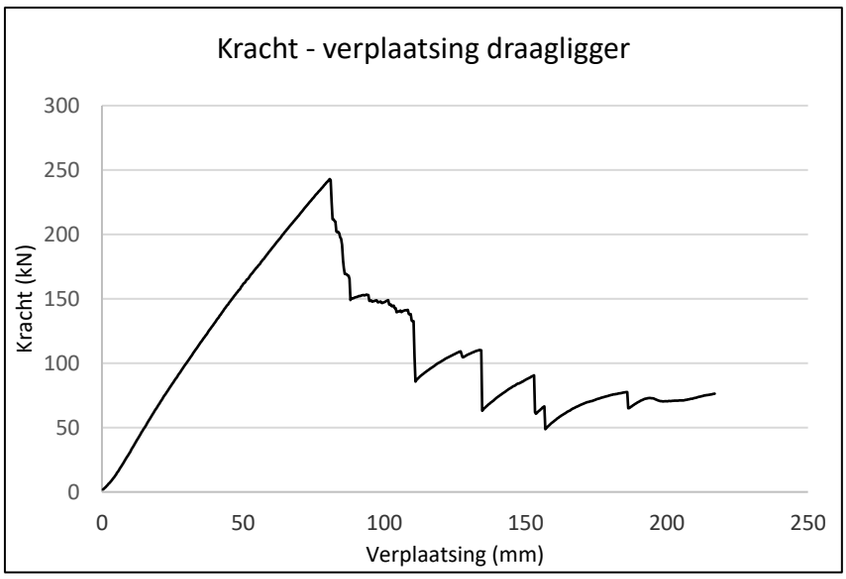
4.3 Draagligger

De draagligger die geproduceerd is (zie Hoofdstuk 3) is getest op buiging bij de Faculteit Lucht- en Ruimtevaarttechniek van de TU in Delft. Het doel van deze balk was om de hoeveelheid nieuwe hars te verminderen door een schuimkern toe te passen. De balk is getest op de maximaal mogelijke overspanning van de drukbank: 2732 mm. De testsnelheid was 1 mm/min voor de stijfheidstests en 10 mm/min voor de test tot breuk en het gedrag na breuk. De maximale kracht bij breuk was 243 kN bij een verplaatsing van 80 mm.

Met de verkregen data is het maximale moment en de buigstijfheid bepaald. Het maximale moment is 166 kNm en de buigstijfheid (EI) van de balk is $1{,}5 \cdot 10^{12}$ N/mm^2.



Figuur 4.19: Proefopstelling



Figuur 4.20: Kracht - verplaatsing diagram

4.4 Dragline-schot

Voordat de productie van de vijf grote hergebruikt composietbalken gestart is, zijn er op kleine schaal een tweetal balkjes gemaakt. Met de productie van deze twee kleine balkjes hebben is een goed beeld gekregen hoe de grote balken het best geproduceerd kunnen worden. Er zijn een aantal productieprincipes getest die vervolgens zijn aangepast en toegepast op de grote balken.

De kleine balkjes zijn vervolgens gebruikt om een aantal praktijktesten uit te voeren. Deze indicatieve testen zijn bedoeld om op kleine schaal te onderzoeken hoe een composietenbalk zich zal houden in de praktijk ten opzichte van een hardhouten balk.
In de eerste proef is met een luchttol een moer en carrosseriering tot het uiterste aangedraaid. Dit is gedaan omdat dit een onderdeel is bij de productie van een draglineschot. Op deze manier worden de vijf losse balken onderling verbonden zodat het één schot wordt. Tijdens deze test werd de carrosseriering krom gedraaid en het balkje vertoonde geen schade. Verder is er een proef uitgevoerd waarbij het balkje van een bepaalde hoogte naar beneden is geworpen en een proef waarbij met de lepels van een heftruck tegen de balk is gestoten. De testen geven een goed beeld hoe een composietenbalk zich zal houden in de dagelijkse praktijk. De uitkomsten van deze eerste indicatieve testen gaven een positief beeld.



Figuur 4.21: Foto valproef





Figuur 4.22: Foto hardhout en composiet met heftrucklepel



Figuur 4.23: Gestapelde schotten



Figuur 4.24: Schot gehesen aan hijspunten

Nadat alle vijf de balken zijn geproduceerd zijn de balken gewogen en vervolgens samengevoegd. De eerste test is het tillen van het schot aan de hijspunten. Het schot bleef mooi in evenwicht. Het schot is vervolgens diverse malen verplaatst met een shovel. Het schot vertoonde geen gebruikssporen door het verplaatsen.

Met het schot is een brug gemaakt met een overspanning van 4meter en vervolgens is er met een shovel (Volvo L60H, bedrijfsgewicht 12.500 kg) overheen gereden. Zie onderstaande foto's.



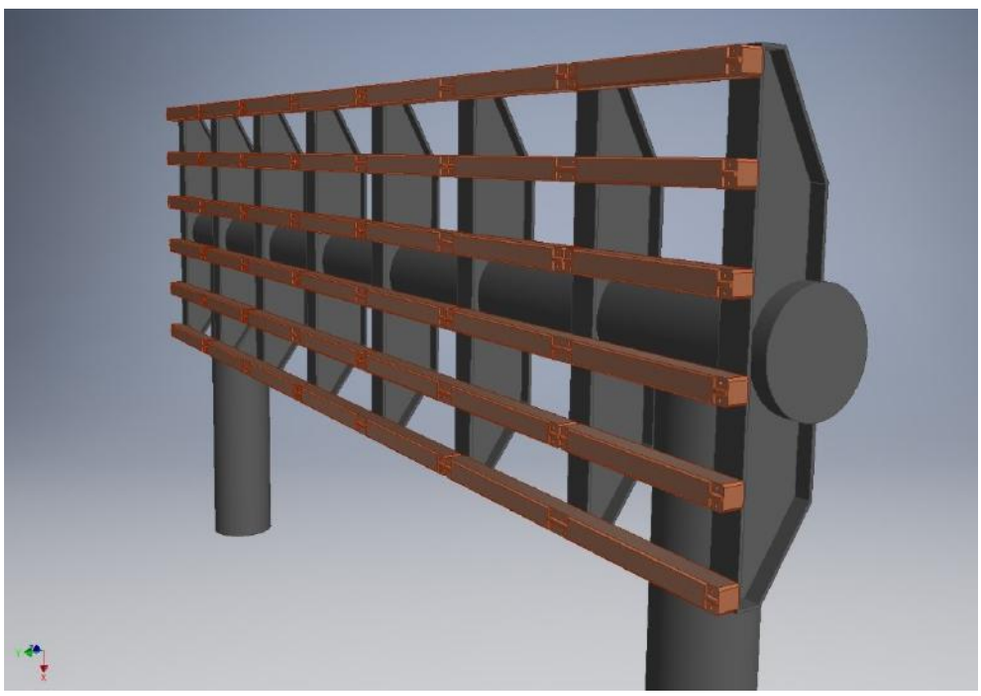


Figuur 4.25 en 4.26: Overbruggingstest

De uitgevoerde testen gaven het vertrouwen dat het schot zich in de praktijk zou moeten kunnen houden. Daarom heeft Welex gezocht naar een klant met een geschikt project om het schot te kunnen plaatsen. Deze plaatsing is gebeurd na de totstandkoming van dit rapport.

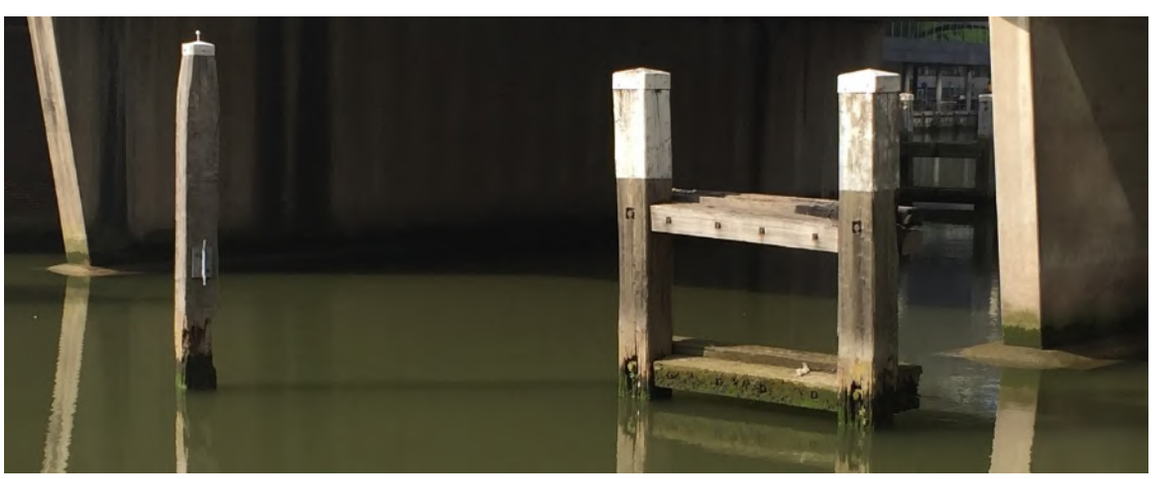
4.5 Wrijfgordingen

Onderstaande figuur laat een artist impression zien van een remmingwerk. Een remmingwerk is bedoeld om kunstwerken, zoals bruggen en sluizen te beschermen tegen aanvaring door schepen. Tevens kunnen remmingwerken dienen als aanmeerplek voor schepen als zij moeten wachten voor de brug.



Figuur 4.27: Remmingwerk

De horizontale balken in het remmingwerk zijn de zogenaamde wrijfgordingen waar het schip tegen aan kan komen bij aanvaring of bij afmeren. Wrijfgordingen worden meestal gemaakt van tropisch hardhout, zoals azobé. Rondom de waterlijn zijn de balken gevoelig voor houtrot en ook het relatief duurzame hardhout is op die plaats na 20 tot 30 jaar verrot (zie foto onder) en moet vervangen worden.



Figuur 4.28: Hardhouten wrijfgording

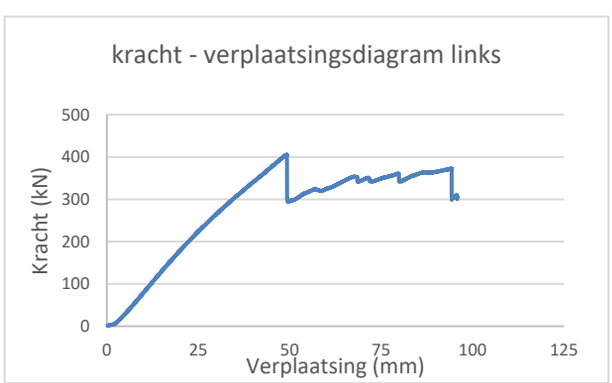


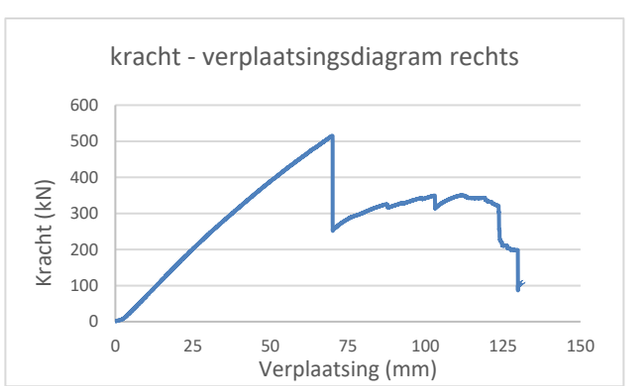
Figuur 4.29: Proefopstelling 3-puntsbuigproef

De prototype wrijfgording is getest op buiging bij de Faculteit Lucht- en Ruimtevaarttechniek van de TU in Delft. De balk was 4 meter lang en is tweemaal getest op buiging met een overspanning van 1,8 meter. Eerst is de linkerhelft getest en daarna de rechter helft. Zie foto van de opstelling. Eerst is een stijfheidsmeting uitgevoerd met een snelheid van 1 mm per minuut tot een kracht van 50 kN. Daarna is de balk ontlast en is met 10 mm per minuut getest tot breuk.

De maximale kracht bij breuk van de linkerhelft van de balk is 405 kN bij een zakking van 50 mm. De balk is bezweken op druk. De bovenzijde van de balk is uitgeknikt bij het drukpunt.

In overleg met de ingenieurs van de Provincie Groningen die bij de test aanwezig waren is bij de rechterhelft is gekozen om het drukpunt te vergroten door er een stalen plaat van 100 x 250 x 10 mm onder te leggen. Dit is gedaan om de kracht beter te spreiden en zo het lokale uitknikken van de huid te voorkomen. Ook benadert dit de praktijk beter omdat een bij een aanvaring van een schip de balk op een groter oppervlak belast wordt. De maximale kracht bij breuk van de rechterhelft was 515 kN bij een zakking van 70 mm. De kracht-verplaatsingsdiagrammen van de testen staan hieronder weergegeven.





Figuur 4.30 en 4.31: Krachtverplaatsingsdiagrammen

Uit de resultaten van de stijfheidsmeting is een buigstijfheid (EI) bepaald van $1{,}12 \cdot 10^{12}$ N/mm^2 voor de linkerhelft en 1,16·1012 N/mm^2 voor de rechterhelft. Het maximale buigend moment bij breuk bij de linkerhelft was 182 kNm en bij de rechterhelft 232 kNm.
Een interessante uitkomst van deze test is dat na het eerste bezwijken de balk nog veel restcapaciteit heeft. Bij de linkerhelft van de balk liep de kracht na het eerste bezwijkpunt bijna weer op naar de maximale kracht bij het eerste bezwijkpunt. De balk kan na het eerste bezwijken nog veel kracht/energie opnemen voordat de balk volledig is bezweken.
Door de provincie Groningen was bepaald dat de balk 440 kN moest kunnen dragen op een overspanning van 1,8 meter. Met 515 kN voldoet de balk ruimschoots aan de gestelde eis van 440 kN.

Als spin-off wil Groningen Seaports binnen een lopend project, waar bij een aantal kunstwerken in de haven van Delfzijl de remmingwerken wordt vervangen. Bij één kunstwerk, de Heemskesbrug, zullen de nieuwe remmingwerken voorzien van hergebruikt composiet balken.
Aan de voor- en achterzijde van de brug zal links en rechts van de brugdoorgang een remmingwerk geplaatst worden. In totaal worden er dus 4 remmingwerken geplaatst. De onderste twee rijen balken zullen uitgevoerd worden in hergebruikt composiet. Deze bevinden zich rondom de waterlijn. De bovenste vier rijen balken zullen in azobé uitgevoerd worden.
De balken zijn geproduceerd door Fiby Products in Emmen. De remmingwerken worden gemaakt door Beens Groep uit Genemuiden. Het monteren en plaatsen van de remmingwerken is gepland in september 2019 en kon daarom niet in deze eindrapportage worden beschreven.

4.6 Extra: dekplanken Dinzerbrug

In dit hoofdstuk staat in het kort een project beschreven waarin hergebruikt composiet is toegepast. Dit project is geen onderdeel van het onderzoeksproject maar toont dat de methode van hergebruik van composieten wordt opgepakt door de markt.

De provincie Fryslân heeft een aantal bruggen over de Stroobosser Trekfeart in eigendom waar tijdens een inspectie is gebleken dat ze niet sterk genoeg meer waren voor hun functie. Deze bruggen zijn meer dan honderd jaar oud en worden nog dagelijks intensief door verkeer gebruikt. Daarom is er een plan opgesteld om deze bruggen te renoveren en te versterken. De oude bruggen hadden houten dekplanken en om de beeldkwaliteit te behouden zijn voor alle bruggen nieuwe dekken met houten dekplanken ontworpen, met uitzondering van één brug: de Dinzerbrug bij Dokkum. Voor deze brug wilde de provincie Fryslân een duurzaam alternatief.

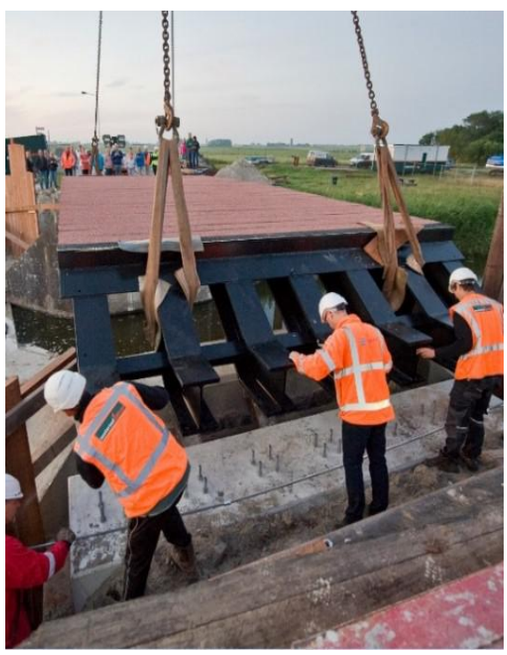

Figuur 4.32: Dinzerbrug oude situatie


Figuur 4.33: Dinzerbrug nieuwe situatie

Royal Haskoning DHV heeft in opdracht van de provincie Fryslân een haalbaarheidsstudie uitgevoerd om dekplanken van composietmateriaal toe te passen. Toen bleek dat composiet planken een haalbaar alternatief kunnen vormen voor houten dekplanken is gezocht naar een product. De producent, Composite Structures in Meerkerk, vormde samen met de provincie Fryslân en Royal Haskoning DHV een bouwteam. Het bouwteam heeft een nieuwe dekplank ontworpen waarbij gebruik is gemaakt van een hergebruikt composiet kern. Een aantal prototypes van deze plank zijn uitvoerig beproefd op mechanische eigenschappen en duurzaamheid, zie ook het artikel van Bijker, Tromp en Siereveld (2019).

De nieuwe dekplanken van hergebruikt composiet zijn vervolgens geproduceerd en vormen nu met succes het nieuwe brugdek van de Dinzerbrug.





Figuur 4.34 en 4.35: Plaatsen brugdek met hergebruikt composiet dekplanken

5. Eigenschappen en ontwerpregels

5.1 Ontwerpsystematiek volgens Eurocode en CUR

In Eurocode EN 1990 is een algemeen geaccepteerde ontwerpmethode voor constructies beschreven. Voor de analyse van een constructie geeft Eurocode EN 1991 de methode voor het aanbrengen van belastingen op het constructiemodel. De daaropvolgende Eurocodes EN 1992 t/m EN 1999 geven richtlijnen voor het verwerken van de materiaaleigenschappen in het constructiemodel voor traditionele materialen zoals staal, beton, hout, aluminium en metselwerk. Voor composieten is er nog geen Eurocode. Echter, de EN 1990 geeft wel een methode op welke manier materiaaleigenschappen kunnen worden bepaald met een proevenprogramma. Dit staat beschreven in Annex D van deze norm: Annex D (Informative) Design assisted by testing.

Bij gebrek aan een internationale norm voor vezelversterkte kunststoffen heeft de CUR in 2004 een richtlijn uitgegeven voor het ontwerpen met vezelversterkte kunststoffen die bekend staat als de CUR-Aanbeveling 96, kortweg CUR96. In 2017 is herziene uitgave hiervan gereedgekomen: CUR 96 Aanbeveling 'Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische toepassingen' die aansluit op de Eurocodes.

In het volgende wordt de systematiek van ontwerpen volgens de Annex D van EN 1990 in combinatie met specifieke gegevens uit de CUR96 voor vezelversterkte kunststoffen in hoofdlijnen toegelicht.

Rekenwaarde UGT via karakteristieke waarde

De rekenwaarde van een materiaaleigenschap, X_d , in de uiterste grenstoestand (UGT) wordt bepaald via de karakteristieke waarde met:

$$X_d = \eta_c \cdot X_k / \gamma_M = \eta_c \cdot m_X \cdot \{ 1 - k_n \cdot V_X \} / \gamma_M$$

In deze formule stellen de parameters het volgende voor:

X_d	=	rekenwaarde van materiaaleigenschap X
η_c	=	conversiefactor
X_k	=	5% karakteristieke waarde van metingen
γ_M	=	materiaalfactor
m_X	=	gemiddelde van gemeten waarden
k_n	=	factor voor 5% karakteristieke waarde
V_X	=	variatiecoëfficiënt (= s_X / m_X)
s_X	=	standaarddeviatie van metingen

De waarde van k_n hangt af van het aantal proeven (n) dat is uitgevoerd. Deze waarden staan in Tabel D1 van EN 1990 (en in tabel B.3 van CUR 96), waarvan er een aantal gegeven zijn in Tabel 5.1, juist bij de minimumaantal proefstukken zoals genoemd in CUR 96 in 'Bijlage B5 Steekproefgrootte' voor verschillende aspecten.

Aantal proeven (n)	3	6	10	20	∞
V_x bekend k_n	1,89	1,77	1,72	1,68	1,64
V_x niet bekend k_n	3,37	2,18	1,92	1,76	1,64

Tabel 5.1. Waarden van k_n voor de 5 % karakteristieke waarde

De conversiefactor, η_c , is materiaal specifiek en verwerkt de invloed van externe effecten op het materiaal: 1) temperatuur en 2) vocht. De conversiefactor is kleiner dan 1.
Daarnaast moeten 3) kruipbreuk en 4) vermoeiingsbreuk worden beschouwd.

De materiaalfactor, γ_M , is ook materiaal specifiek en verwerkt van a) onzekerheden in de geometrie b) modelonzekerheden in het krijgen van de juiste materiaaleigenschap c) onzekerheden in de spreiding van de materiaaleigenschap. Een en ander is mede afhankelijk van de productiemethode. De materiaalfactor is groter dan 1.

Rekenwaarde UGT rechtstreeks uit proeven

De rekenwaarde van een materiaaleigenschap, X_d , in de uiterste grenstoestand (UGT) wordt rechtstreeks bepaald uit proeven met:

$$X_d = \eta_c \cdot m_X \cdot \{ 1 - k_{d,n} \cdot V_X \}$$

In deze formule stelt de aanvullende parameter het volgende voor:

$k_{d,n}$ = factor voor rekenwaarde

De waarde van $k_{d,n}$ hangt af van het aantal proeven (n) dat is uitgevoerd. Deze waarden staan in Tabel D2 van EN 1990 (en in tabel B.4 van CUR 96), waarvan er een aantal gegeven zijn in Tabel 5.2.

Aantal proeven (n)	3	6	10	20	∞
V_x bekend $k_{d,n}$	3,56	3,33	3,23	3,16	3,04
V_x niet bekend $k_{d,n}$	-	6,36	4,51	3,64	3,04

Tabel 5.2. Waarden van $k_{d,n}$ voor de rechtstreekse rekenwaarde

Rekenwaarde BGT

De rekenwaarde van een materiaaleigenschap, X_d , in de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT) wordt bepaald via de gemiddelde waarde met:

$$X_d = \eta_c \cdot m_X$$

De conversiefactor, η_c , verdisconteert in de BGT naast de invloed van omgevingseffecten op het materiaal: 1) temperatuur en 2) vocht ook de invloed van belastingeffecten 3) kruip en 4) vermoeiing op de materiaaleigenschappen die een rol spelen bij vervorming (E-modulus; in sommige gevallen G-modulus en dwarscontractie ν, trilling (demping δ) of schade.
Om een betrouwbare BGT-rekenwaarde te bepalen zijn 10 proeven nodig.

N.B.: De steekproefgrootte is afgeleid uit CUR 96 Bijlage B5, waarbij geïnterpreteerd is dat een gedetailleerde probabilistisch analyse noodzakelijk is in de categorie variatiecoëfficiënt 'niet bekend' vanwege de onbekende spreiding van r-VVK.

Rekenwaarde UGT: via karakteristieke waarde, rechtstreeks uit proeven of onnodig

Bij nieuwe materialen zoals r-VVK moet worden gegrepen naar de rechtstreekse wijze, omdat er (nog) geen materiaalfactor voorhanden is. De rechtstreekse wijze voor r-VVK, komt veelal gunstiger uit dan wanneer deze wordt bepaald via de karakteristieke waarde en de materiaalfactor voor nieuw VVK zou worden gebruikt.

N.B.: bij r-VVK geldt dat voor de variatiecoëfficiënt de categorie 'niet bekend' moet worden aangehouden vanwege de onbekende spreiding van r-VVK. Als waarde voor de variatiecoëfficiënt moet daarbij $\geq$0,10 worden aangehouden conform EN 1990 D7.1.

Als r-VVK-lamellen alleen worden meegenomen voor de stijfheid (BGT), dan speelt deze discussie in het geheel niet. Voor de stijfheid moet immers met de gemiddelde waarde van de E-modulus gewerkt worden.

N.B.: Om een betrouwbare UGT-rekenwaarde te bepalen zijn is een steekproefgrootte van 20 nodig en in de BGT van 10, e.e.a. conform CUR 2017 B5.

N.B.: Als de scheursterkte van r-VVK overgenomen moet kunnen worden door de schil van maagdelijk VVK, dan moet hiervoor gemiddelde waarde worden aangehouden (zie § 5.4).

In het algemeen is het gunstiger om uit gaan van een lognormale verdeling dan van een normale verdeling. Gebruik van deze verdeling wordt ook in EN 1990 toegelicht. Keuze van de verdeling moet uiteraard afgestemd worden op de vorm van het histogram.

5.2 Aanvullende eisen aan her te gebruiken VVK-delen en classificatie

In de uitgevoerde onderzoeken zijn End of Life (EoL) VVK-constructies omgezet naar VVK-delen in de vorm van gezaagde stroken, geknipte stroken of vermalen vlokken: gezamenlijk genoemd recyclet-VVK delen of verkort r-VVK delen dan wel ook ingekort r-VVK. Zie tevens Figuur 5.1.



Figuur 5.1 en 5.2: r-VVK delen in de vorm van stroken (links) en vlokken (rechts)

Eisen voor leveranciers van r-VVK-delen

Als, door mechanische recycling verkregen, r-VVK-delen gebruikt worden als constructief deel in een nieuwe composiet, dan worden hieraan in elk geval de volgende eisen gesteld:

Zuiver — r-VVK delen mogen alleen uit End of Life VVK bestaan.

N.B.: EoL-VVK moet daartoe ontdaan worden van overig materiaal zoals delen van hout, schuim, steen, glas, rubber of metalen.
N.B.: Binnen-vlakken moeten worden ontdaan van aangelijmde kernresten, bijvoorbeeld door stralen van grote EoL-VVK-delen.
N.B.: Andere materialen kunnen zwakker, brosser, flexibeler of juist stijver zijn dan VVK.

Ruw — r-VVK delen moeten hechtend ruw zijn.

N.B.: Buiten-vlakken (al dan niet gecoat) moeten worden opgeruwd tot hechtende vlakken, bijv. door stralen van grote EoL-VVK-delen.
N.B. Het verkleiningsproces van EoL-VVK tot r-VVK delen moet hechtend ruwe breuk-/verspaan-vlakken opleveren.

Vetvrij — r-VVK delen moeten vetvrij zijn.

N.B.: Ontvetten kan reeds met grote EoL-VVK-delen, mits deze vervolgens vetvrij worden gehouden.

Droog — r-VVK delen moeten droog zijn.

N.B. EoL-VVK moet daartoe ontdaan worden van ontvettingsmiddel en overtollig water tot een evenwichtsniveau van RH = 50% bij 10°C.
N.B.: Deze toestand kan versneld worden bereikt middels drogen bij verhoogde temperatuur.

Stofvrij — r-VVK delen moeten stofvrij zijn.

Bovenstaande leverantie-eisen zijn grotendeels ontleend aan CUR96:2017 m.b.t. lijmverbindingen.

Eisen voor herverwerking van r-VVK-delen

Als, door mechanische recycling verkregen, r-VVK-delen gebruikt worden als constructief deel in een nieuwe composiet, dan worden hieraan in elk geval de volgende eisen gesteld:

Productie eisen
r-VVK-verwerking moet worden uitgevoerd door voldoende geïnstrueerd personeel onder deskundig en ervaren toezicht.
r-VVK-verwerking moet worden gerealiseerd onder geconditioneerde omstandigheden volgens de verwerkingsvoorschriften van de hars/lijmleverancier.

Compatibele hars
r-VVK-constructiedelen verbinden met een compatibele hars en volledige benatting.

N.B.: een UP-hars hecht goed op VVK delen met UP, maar matig op VVK delen met EP. Een EP-hars hecht over het algemeen goed op beide.

Een te lage ILSS-waarde wijst bijvoorbeeld op:

- op slechte omstandigheden tijdens de productie: verontreinigd, glad, vet, nat of stof
- het niet compatibel zijn van nieuwe hars en EoL-hars of op onvolledige benatting.

Compatibel klimaat
Om bepaling van glasovergangstemperaturen voor r-VVK te vermijden wordt gekozen om r-VVK-constructiedelen alleen toe te passen in een compatibele of lagere omgevingstemperatuur als in de vorige levenscyclus. D.w.z. r-VVK's uit vorige toepassingen in een:
- buitenklimaat (zoals rotorbladen, boten, tanks, etc.) mogen worden toegepast voor r-VVK delen voor constructies in buiten- en binnenklimaat;
- binnenklimaat (zoals binnenbekleding treinstellen) mogen worden toegepast voor r-VVK delen voor constructies in binnenklimaat.

Compatibele kleur
Om vergelijking van temperatuureffecten door kleur- en directe zonnebeschijning tussen vorige en nieuwe toepassing te vermijden, mogen r-VVK-constructiedelen alleen in lichte kleuren/coating worden toegepast.

N.B.: VVK kent een beperkte afname van sterkte en stijfheid onder invloed van temperatuur op de harseigenschappen, zolang de temperatuur onder de glasovergangstemperatuur blijft.
N.B.: Gebruik van lichte kleuren draagt bij aan beperking van verlichtingsniveau, en draagt buiten bij aan beperking van hittestress in de gebouwde omgeving.

Bovenstaande verwerkingseisen zijn grotendeels ontleend aan CUR96:2017 m.b.t. §8.1 Verbindingen – Algemeen, §2.3.4 Overgangstemperatuur en §8.2 Lijmverbindingen.

Classificatie

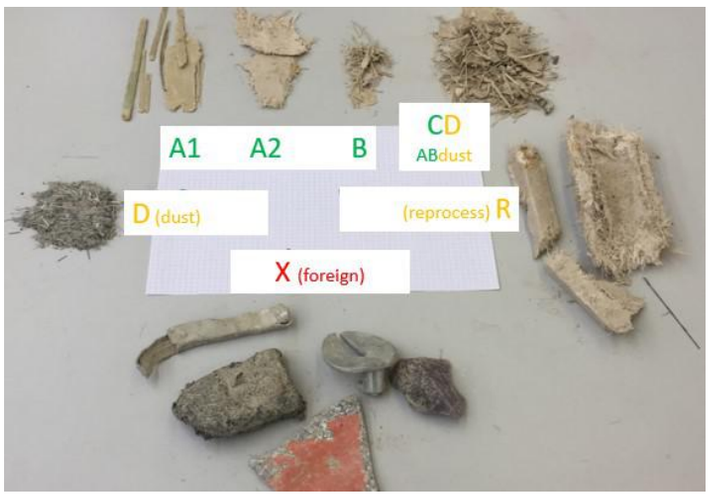
Classificatie vermalen EoL VVK (vlokken)

Her te gebruiken EoL VVK-vlokken zijn geclassificeerd. Op basis van overwegingen van herkomst, verwerkbaarheid en eindeigenschappen is de indeling opgesteld zoals in Tabel 5.3 weergegeven (zie uitgebreidere achtergrond in Hoofdstuk 2), en in Figuur 5.2 gevisualiseerd.

Pulverized EoL FRP			L [mm]		B [mm]	D [mm]
Grade	Description	Origin	►	◄	◄	◄
A1	coarse	high end FRP*	25	150	50	2
A2		low end FRP				5
B	fine	all end FRP	5	50		2
C	Combi AB: coarse & fine	all end FRP	5	150	50	5
D	Dust / powder	all end FRP	0	10		2
CD	coarse to dust	all end FRP	0	150	50	5
				►	►	►
R	Reprocess			150	50	5
X	Non-FRP	Inserts, cores, etc.				

Figuur 5.3: Classificatie vermalen EoL VVK *high end: ▸50% fibre volume

N.B.: Vermalen EoL VVK moet worden gescheiden in vreemde materialen (X), te grote (R) en voldoende verkleinde VVK delen (grove en fijne VVK vlokken en VVK-stof) (CD). De te grote delen (R) kunnen opnieuw worden vermalen.
Om een goede lijmverbinding te verkrijgen moet VVK onder meer stofvrij zijn. Daartoe kan CD worden ontdaan van de categorie stof (D). Om het poeder toch circulair te kunnen gebruiken wordt gedacht deze al dan niet verbrand in te zetten als vulstoffen of bindmiddel in (geopolymeer) beton.



Figuur 5.4: Classificatie vermalen EoL VVK

Classificatie stroken

Bovenstaande classificatie geldt niet voor gezaagde of geknipte stroken, bijvoorbeeld omdat daarbij juist grote lengtes voordelig kunnen zijn. Wel kunnen hierbij VVK-spaanders vrijkomen (vlokken en stof) die in de categorieën A t/m D vallen, en vreemde materialen die verwijderd moeten worden.

Afbakening

In de Tabel 5.4 worden de verschillende combinaties gegeven hoe EoL VVK wordt vrijgemaakt en hoe het kan worden hergebruikt in nieuwe producten. Alleen de omkaderde hergebruikopties worden in dit rapport beschouwd.

	Huid(en)		Interface	Kern	
Componenten:	Vezels	Solid hars			
VVK	VVK				
verkleind EoL	r-VVK delen + stof				
Componenten:	Vezels	Solid hars		Schuim	
VVK-sandwich	VVK		Solid matrix	Schuim	
verkleind EoL	r-VVK delen + stof			Schuimdelen	
Componenten:	r-VVK delen	Vezels	Solid hars		
VVK met r-VVK	r-VVK	VVK			
verkleind EoL	r-VVK delen + stof				
r-VVK-kern met massieve hars	Componenten:		Solid hars	Solid hars	VVK delen
r-VVK-kern met schuimende hars	Componenten:		Solid hars	Schuimende hars	VVK delen
r-schuim kern	Componenten:		Solid hars	Schuimende hars	Schuimdelen

Figuur 5.5 Afbakening beschouwd hergebruik VVK delen.

Er is uitgegaan van EoL VVK zoals in CUR 96:2017 met:

- massieve thermoharde harsen geschikt voor draagconstructies: veelal UP/VE/EP en soms ook BMI/PU/PF/MMA;
- ingebedde vezels die minimaal de stijfheid hebben van E-glas. Dit omvat ook andere glasvezels en koolstof, basalt of aramidevezels, maar geen van natuurvezels.

5.3 Proevenprogramma en resultaten

Het hier beschreven proevenprogramma is uitgevoerd op r-VVK, dit om de bijdrage van r-VVK vast te kunnen stellen wanneer het verwerkt wordt in nieuw VVK. Uitgevoerde proeven op r-VVK verwerkt in nieuw VVK is beschreven bij demonstrators.

Buigproeven met vermalen vlokken

In het kader van een afstudeerproject is EoL VVK, bestaande uit glasvezel en UP-hars, vermalen tot r-gemengde VVK vlokken (categorie C). In een gesloten balenpers voor r-VVK-vlokken is onder bijmenging van UP-hars een balk gemaakt met een dikte van circa 50 mm. Uit de balk zijn balkjes gezaagd met een dikte van 20 mm, een breedte B ≈ 100 mm en een lengte L ≈ 400 mm voor 3-puntsbuigproeven met een overspanning van ℓ = 320 mm en een beproevingssnelheid van 1 mm / min. Zie tevens onderstaande figuren (Garcia Villamor, 2018)



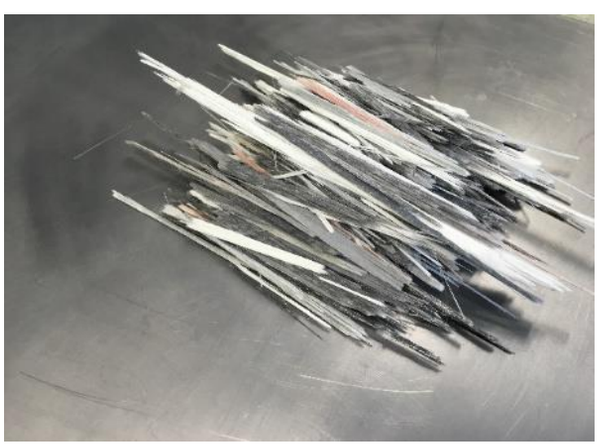

Figuur 5.6 en 5.7: Balenpers: balk van vermalen vlokken en opstelling buigproeven gezaagde balkjes

In het kader van een ander afstudeerproject is EoL VVK, bestaande uit glasvezel en UP-hars, vermalen tot r-fijne VVK vlokken (categorie B). In een gesloten mal is UP-hars geïnfuseerd waarmee in de kern van een balk waaruit balkjes zijn gezaagd met een hoogte H ≈ 60 mm, een breedte B ≈ 60 mm en een lengte L ≈ 1200 mm voor 3-puntsbuigproeven met een overspanning van ℓ = 400 mm en een beproevingssnelheid van 4,4 mm / min. Zie tevens figuur 5.8. (Camping, 2019)




Figuur 5.8 en 5.9 Vacuüminfusie kern van vermalen vlokken en opstelling buigproeven gezaagde balkjes

Proeven van met handgeselecteerde vlokken in de vorm van plaatjes en georiënteerde splinters (zie *Figuur 5.10 en 5.11*) in EP-hars vacuüm geïnfuseerd, zijn beschreven in KIEM VANG 4 (Bouwmeester, 2017).




Figuur 5.10 en 5.11: Splintervormige vlokken (van UD) en plaatjesvormige vlokken (van CSM)

De resultaten van deze proeven op vlokken zijn samengevat in Tabel 5.3.

Proefbalken gemaakt met:	Dichtheid kg/m^3	Glasvezelgehalte (volume)
vlokken en stof in UP-hars in balenpers	1.370	~13%
fijne vlokken in UP-hars in balk-kern met vacuüm infusie	1.370	~13%
plaatjes vlokken in EP-hars met vacuüm infusie	1.440	~18%
georiënteerde splinter vlokken in EP/vacuüm infusie	1.610	~30%

Proefbalken gemaakt met:	Gemiddelde E-buigmodulus N/mm^2		
	Gemeten [var. coëf]	Verwacht bij CSM o.b.v. glasvezelgehalte	Referentie UP-hars
vlokken en stof in balenpers n=4	5.800 .	6.600	3.550
plaatjes-vlokken in EP-hars n=5	3.200 [0,38]	7.900	
splinter-vlokken in EP-hars n=5	11.500 [0,28]	11.400	

Proefbalken gemaakt met:	Gemiddelde buigsterkte N/mm^2		
	Gemeten {breukrek} [var. coëf]	Verwacht bij CSM o.b.v. gemeten buigmodulus	Referentie UP-matrix
vlokken en stof in balenpers n=4	21 {0,4%} .	5.800 · 1,2%/0,8^5 = 87	55
fijne vlokken vacuüm infusie n=3	19 .		
plaatjes-vlokken in EP-hars n=5	53 {1,6%} [0,27]	3.200 · 1,2%/0,8^5 = 48	
splinter-vlokken in EP-hars n=5	220 {1,9%} [0,24]	11.500 · 1,2/0,8^5 = 172	

Tabel 5.3: Buigingsresultaten proefstukken met vlokken

De resultaten laten zien dat er met vermalen vlokken:

- heel veel hars wordt verbruikt
- sprake is van vezel verzwakt kunststof
- beperkt sprake is van vezel verstijfd kunststof.

Een uitzondering hierop vormt r-VVK op basis van georiënteerde splinters, daarmee zijn gunstiger harsverbruik en mechanische waarden haalbaar. De splinters betreffen echter slechts een beperkt deel van het vermalen VVK, én oriënteren is een zeer bewerkelijk proces.

N.B.: r-VVK op basis van vermalen vlokken haalt het minimum vezelvolumegehalte van 15% waarvoor de CUR 96 niet altijd van toepassing is. Tezamen met een nieuwe VVK-omhulling is dit gemiddeld wel haalbaar.

Buigproeven met 3 lagen stroken

Er zijn nieuwe GVK platen van circa 4 mm dik met hand gelamineerd van 10 lagen 0-90 E-glas van 300 gram/m^2 weefsel met UP-hars. Uit deze platen zijn stroken gemaakt van b = 20 mm en:

- l = 500 mm door te zagen met een cirkelzaag (niet onderbroken stroken: l = "∞")
- l = 150 mm door te zagen met een cirkelzaag
- l = 150 mm door te knippen met een shredder (de stroken waren halverwege vaak geknikt).

In een luchtdichte gelaste stalen mal zijn met vacuüm infusie met UP-hars planken gemaakt met een dikte van 3 x circa 4 mm.

Uit de planken zijn balkjes gezaagd met een breedte B ≈ 90 mm en een lengte L ≈ 500 mm voor 3-puntsbuigproeven met een overspanning van ℓ = 400 mm. De volgende balkjes zijn beproefd:

- 4 buigproefbalkjes gemaakt met platen (referentie)
- 6 buigproefbalkjes gemaakt met gezaagde stroken l = ∞ mm (niet onderbroken) (referentie)
- 6 buigproefbalkjes gemaakt met gezaagde stroken l = 150 mm in halfsteens stapeling
- 3 buigproefbalkjes gemaakt met geknipte stroken l = 150 mm in halfsteens stapeling.

Hiermee is het effect van verzagen en verknippen bepaald.

Product	Glasvezelgehalte (volume)	Harsgehalte (volume)		
		Totaal	Handlam.	Vacuüm
GVK platen uit weefsel	37,9%	62,1%	62,1%	n.v.t.
Proefbalk uit 3 lagen platen	35,5%	64,5%	58,1%	6,4%
Proefbalk uit 3 lagen gezaagde stroken l = ∞ mm	34,0%	66,0%	56,1%	9,9%
Proefbalk uit 3 lagen gezaagde stroken l = 150 mm	35,2%	64,8%	57,9%	6,9%
Proefbalk uit 3 lagen geknipte stroken l = 150 mm	20,4%	79,6%	33,4%	46,2%

Proefbalken gemaakt uit 3 lagen	Gemiddelde E-buigmodulus N/mm²		
	Gemeten	Verwacht bij doorlopende weefsels	Referentie UP-hars
Platen	16.800	18.000·93,6% +3.550· 6,4% = 17.100	
Gezaagde stroken l = ∞ mm	18.100	18.000·90,1% +3.550· 9,9% = 16.500	
Gezaagde stroken l = 150 mm	17.100	18.000·93,1% +3.550· 6,9% = 16.900	3.550
Geknipte stroken l = 150 mm	11.200	18.000·53,8% +3.550·46,2% = 11.200	

Proefbalken gemaakt uit 3 lagen	Gemiddelde buigsterkte N/mm²		
	Gemeten {breukrek}	Verwacht o.b.v. gemeten buigmodulus	Referentie UP-matrix
Platen	321 {1,9%}	16.800 · 1,2%/0,8 = 252	
Gezaagde stroken l = ∞ mm	341 {1,9%}	18.100 · 1,2%/0,8 = 272	
Gezaagde stroken l = 150 mm	98 {0,6%}		55
Geknipte stroken l = 150 mm	54 {0,5%}		

Tabel 5.4: Buigingsresultaten proefstukken met 3 lagen stroken

Buigproeven met 9 lagen stroken

Er zijn nieuwe GVK platen van circa 4 mm dik met de hand gelamineerd van 10 lagen 0-90 E-glas van 300 gram/m² weefsel met UP-hars. Uit deze platen zijn stroken gemaakt van b = 20 mm en:

- l = 150 mm door te zagen met een cirkelzaag
- l = 150 mm door te knippen met een shredder (de stroken waren halverwege vaak geknikt).

In een luchtdichte gelaste stalen mal zijn met vacuüm infusie met UP-hars planken gemaakt met een dikte van 9 x circa 4 mm. Uit de planken zijn balkjes gezaagd met een breedte B ≈ 90 mm en een lengte L ≈ 1000 mm voor 3-puntsbuigproeven met een overspanning van ℓ = 600 mm. De volgende balkjes zijn beproefd:

- 3 buigproefbalkjes gemaakt met platen (referentie)
- 6 buigproefbalkjes gemaakt met gezaagde stroken l = 150 mm in halfsteense stapeling
- 3 buigproefbalkjes gemaakt met geknipte stroken l = 150 mm in halfsteens stapeling.

Hiermee is het effect van verzagen en verknippen bepaald, en het verschil ten opzichte van 3 lagen.

Product	Glasvezelgehalte (volume)	Harsgehalte (volume)		
		Totaal	Handlam.	Vacuüm
GVK platen uit weefsel	37,9%	62,1%	62,1%	n.v.t.
Proefbalk uit 9 lagen platen	32,9%	67,1%	53,9%	13,2%
Proefbalk uit 9 lagen gezaagde stroken l = 150 mm	34,2%	65,8%	56,4%	9,4%
Proefbalk uit 9 lagen geknipte stroken l = 150 mm	15,6%	84,4%	25,5%	58,9%

Proefbalken gemaakt uit 9 lagen	Gemiddelde E-buigmodulus N/mm^2		
	Gemeten	Verwacht bij doorlopende weefsels	Referentie UP-hars
Platen	14.900	18.000·86,8% +3.550·13,2% = 16.100	
Gezaagde stroken l = 150 mm	12.700	18.000·90,6% +3.550·9,4% = 16.500	3.550
Geknipte stroken l = 150 mm	7.300	18.000·41,1% +3.550·58,9% = 9.300	

Proefbalken gemaakt uit 9 lagen	Gemiddelde buigsterkte N/mm^2		
	Gemeten {breukrek}	Verwacht o.b.v. gemeten buigmodulus	Referentie UP-matrix
Platen	298 {2,0%}	14.900 · 1,2/0,8 = 224	
Gezaagde stroken l = 150 mm	92 {0,7%}		55
Geknipte stroken l = 150 mm	58 {0,8%}		

Tabel 5.5 Buigingsresultaten proefstukken met 9 lagen stroken

De geknipte stroken waren halverwege vaak geknikt, waardoor stroken recht plaatsen en stapelen erg lastig is. Er wordt daarmee veel extra hars verbruikt bij vacuüm infusie, bij 9 lagen nog meer dan bij 3 lagen.
Bij 3 lagen met onderbroken stroken loopt de stijfheid zeer beperkt terug ten opzichte van wat op basis van vezelgehalte verwacht wordt bij niet onderbroken stroken, bij 9 lagen loopt deze wat meer terug. Er is dus in alle gevallen van recycling sprake van vezel verstijfd kunststof.
Bij geknipte stroken loopt de sterkte terug tot de sterkte van de hars. Bij gezaagde stroken is er wel sprake van vezel versterkt kunststof zij het beperkt.

ILSS-secondary bonding proeven met 4 lagen stroken

Er zijn nieuwe GVK platen van circa 5 mm dik met de hand gelamineerd van 6 lagen CSM van 450 gram/m^2 met UP-hars. Uit de platen zijn stroken gezaagd van b = 20 mm en:

- l = 40, 80, 200 en ∞ mm door te zagen met een cirkelzaag welke ruw waren m.b.v. peel ply, om de invloed van de strooklengte te bezien
- l = 40 mm door te zagen met een cirkelzaag welke glad waren m.b.v. mal / vacuüm-folie, om de invloed van ruwheid van hechtoppervlakte te bezien

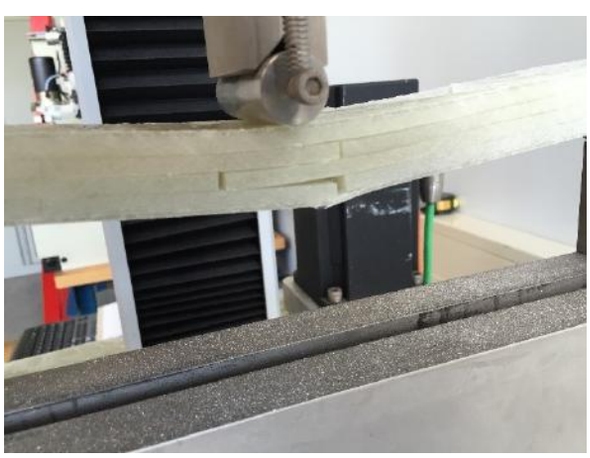
De stroken zijn halfsteens gestapeld in een luchtdicht gelaste stalen mal tot een dikte van 4 x circa 5 mm. De stroken zijn ingepakt in 2 lagen CSM van 450 gram/m^2. In deze mal zijn planken gemaakt middels vacuüm infusie met UP-hars. Uit de planken zijn 5 balkjes gezaagd (n = 10 proefzijden) met een breedte H ≈ 23 mm, B ≈ 50 mm en een lengte L ≈ 450 mm voor 3-puntsbuigproeven met een overspanning van ℓ = 150 mm (ILSS-proeven met ℓ/H ≈ 6) en van ℓ = 360 mm (buigproeven ℓ/H ≈ 16).

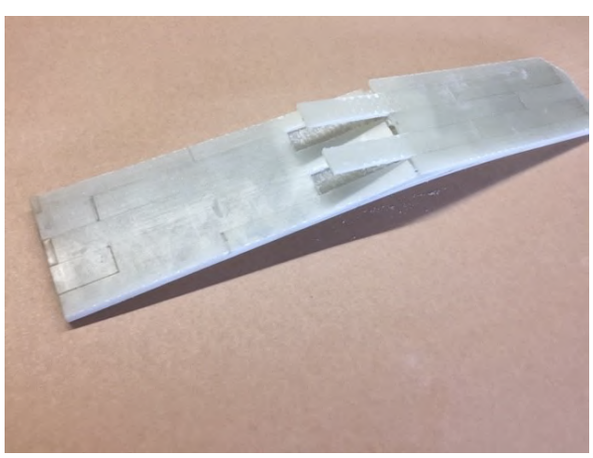
Product	Glasvezelgehalte (volume)	Harsgehalte (volume)		
		Totaal	Handlam.	Vacuüm
GVK platen uit CSM	21%	79%	79%	n.v.t.
Proefbalk uit 4 lagen gezaagde strookjes	~19%	~81%	~71%	~10%

Proefbalken gemaakt uit 4 lagen (KIEM VANG 3)	ILSS Secondary bonding N/mm^2		ILSS (referentie)
	gemiddelde	karakteristiek (met k_n = 1,92)	Karakteristiek (CUR '96)
gezaagde stroken l = 40 mm glad	2,4	2,0	20
gezaagde stroken l = 40 mm ruw	6,4	4,1	
gezaagde stroken l = 80 mm ruw	8,1	6,6	
gezaagde stroken l = 200 mm ruw	8,5	7,0	
gezaagde stroken l = ∞ mm ruw	14,8	11,5	
Project Dinzerbrug	-	18,9	

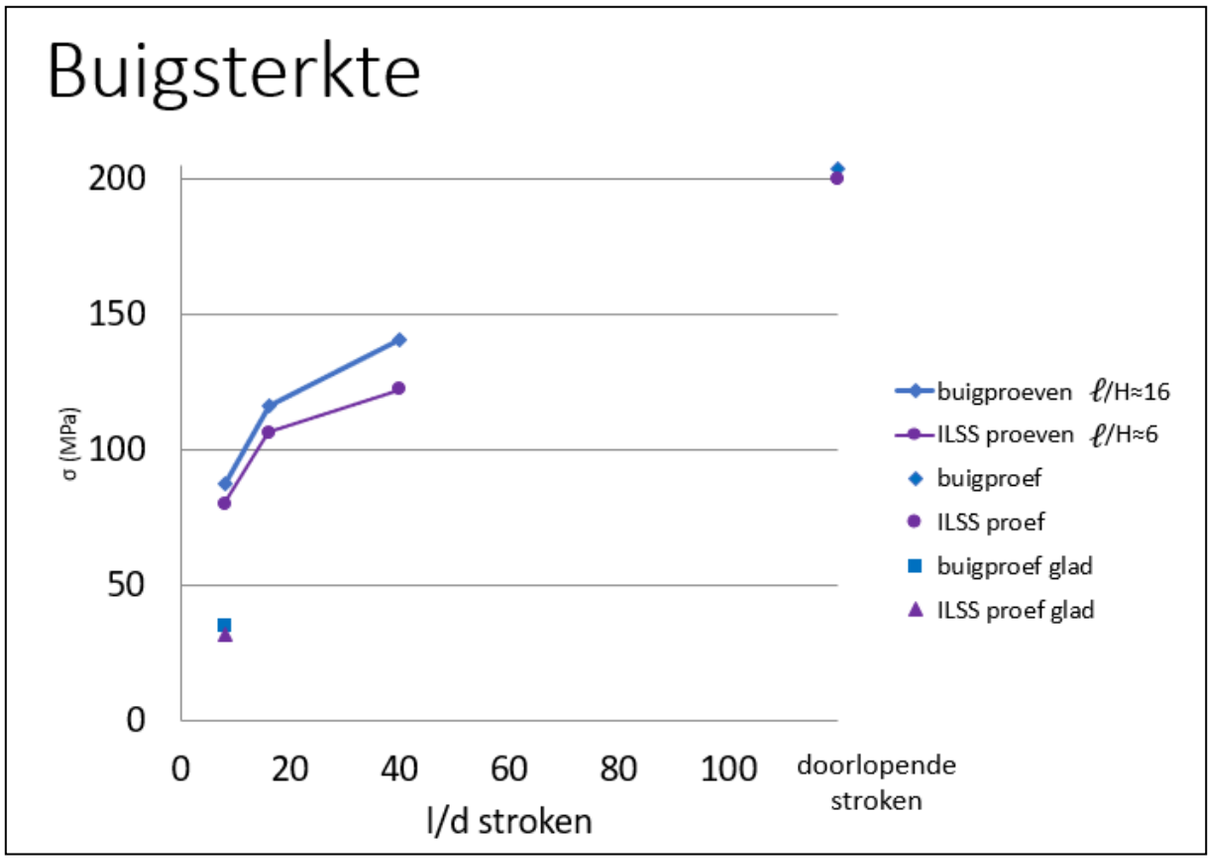
Tabel 5.6 ILSS-SB-resultaten proefstukken met 4 lagen stroken

Dat oppervlakte ruw moeten zijn voor goede aanhechting lijkt evident en dit wordt ondesteund door de proeven (zie Tabel 5.6). In *Figuur 5.12 en 5.13* toont het bezwijkbeeld van ILSS-SB proeven.





Figuur 5.12 en 5.13: Breukbeeld ILSS-SB proefstuk met 4 lagen stroken



Figuur 5.13: ILSS-SB proefstukken bezwijken op buiging

Uit *Figuur 5.13* blijkt dat ook bij ℓ/H = 6 buiging maatgevend is en niet afschuiving. Daarom wordt in §5.4 ℓ/H = 4 voorgeschreven bij ILSS-SB-proeven.

Bij project "Dekplanken Dinzerbrug" van Provincie Friesland blijkt dat een ILSS te behalen is voor een r-VVK-kern bestaande uit recyclaat snippers die nagenoeg gelijkwaardig is aan de ILSS van nieuw VVK met UP. (Bijker, Tromp, & Siereveld, 2019)

Vermoeiing E-modulus proeven (t.b.v. conversiefactor)

Voor proefstukken met gezaagde onderbroken stroken in 3 lagen is voor n = 1 proefstuk onderzocht middels 3-puntbuigproef hoe de E-modulus voor buiging terugloopt binnen 1.000 cycli, zie *Tabel 5.9* en *Figuur 5.8*. De herhaalde belasting is verricht tot circa 50% van de bezwijkrek ofwel 0,5*0,6 = 0,3% rek. De E-modulus loopt met circa 2% terug na 100 belasting-wisselingen en circa 4% terug na 1.000 belasting-wisselingen.

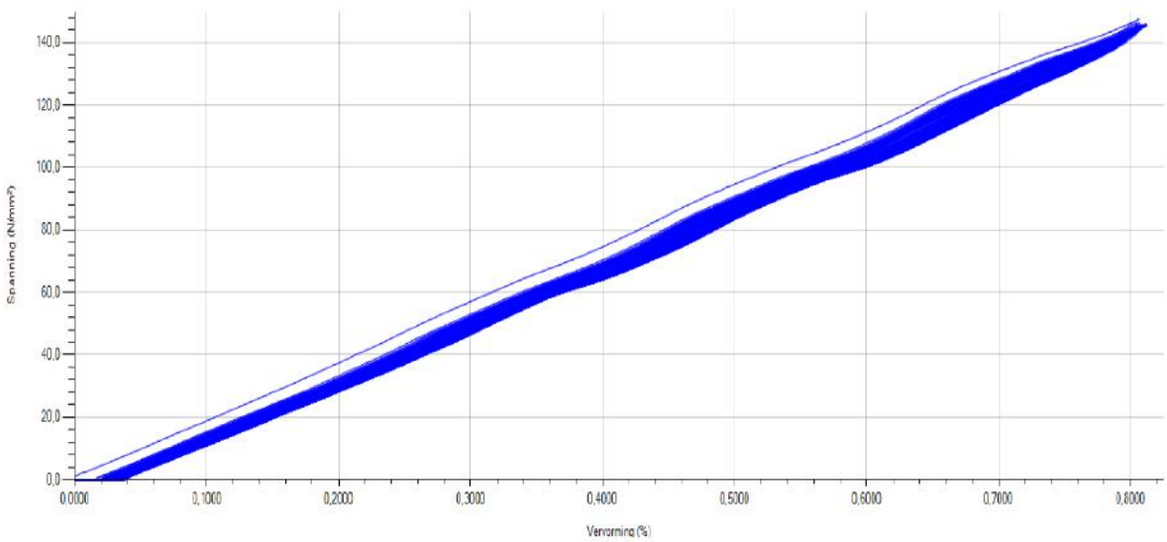
cyclus	1	2	3	98-100	998	999	1.000
E (MPa)	16.817	16.775	16.666		16.148	16.166	16.075
Gemiddelde	16.753			16.391	16.130		

Tabel 5.7 Vermoeiing E-buiging balk B ≈ 90, T ≈ 12 & L ≈ 600 mm; ℓ = 400 mm; samengesteld uit gezaagde stroken b ≈ 20, t ≈ 4 & l ≈ 150 mm

Als referentie is voor proefstukken met gezaagde niet onderbroken stroken in 3 lagen is voor n = 1 proefstuk onderzocht middels 3-puntbuigproef hoe de E-modulus voor buiging terugloopt binnen 100 cycli, zie *Tabel 5.8*. De herhaalde belasting is verricht tot circa 50% van de bezwijkrek ofwel 0,5*1,9 ≈ 0,8% rek. De E-modulus loopt met circa 2% terug na 100 belasting-wisselingen.

cyclus	1	2	3		98	99	100
E (MPa)	17.398	17.023	17.016		16.847	16.781	16.842
Gemiddelde	17.146				16.823		

Tabel 5.8 Vermoeiing E-buiging balk B ≈ 90, T ≈ 12 & L ≈ 600 mm; ℓ = 400 mm; samengesteld uit gezaagde stroken b ≈ 20, t ≈ 4 & l ≈ 600 mm



Figuur 5.14 σ–ε-buiging 1.000 cycli voor balk B ≈ 90, T ≈ 12 & L ≈ 600 mm; ℓ = 400 mm; samengesteld uit gezaagde stroken b ≈ 20, t ≈ 4 & l ≈ 150 mm

5.4 Eisen voor bezwijkgedrag met r-VVK en beproeving van r-VKK

Bezwijkgedrag met r-VVK

De ontwerpeisen voor r-VVK aangaande bezwijkgedrag worden eerst ingeleid met een toelichting van de bezwijkfilosofie van enkele andere constructiematerialen.

Staal kent na een groot vloeitraject ook nog een versterking alvorens het bezwijkt. Een gat-verzwakking kan zodanig worden beperkt, dat de hele staaf vloeit voordat de zwakste schakel met bijvoorbeeld een bout-gat de volledige versterking heeft bereikt. Een staalconstructie kan daarmee waarschuwen met een grote plastische vervorming voordat het bezwijkt.

Constructief beton kan door de hoeveelheid versterking slim te kiezen eveneens waarschuwen voordat het bezwijkt:

- een minimum hoeveelheid wapening zorgt ervoor dat op het moment dat het beton bros op trek scheurt, de wapening het kan overnemen. Bij verder belasten gaat de stalen wapening vloeien, voordat de constructie bezwijkt;
- een maximum hoeveelheid wapening zorgt er bij buiging voor dat het wapeningsstaal eerder vloeit dan dat het beton bros op druk zou bezwijken.

Nieuw VVK bezwijkt relatief bros, maar heeft een kleine spreiding bij beproeving op sterkte. Daarmee kan met een voldoende grote materiaalfactor toch een veilige constructie worden gemaakt. Overigens is bij VVK de vervorming veelal maatgevend en is de sterkte van minder belang, omdat bij overbelasting de te grote vervorming alsnog waarschuwend werkt.

Bij r-VVK is er voor gekozen om de her te gebruiken VVK-delen alleen een verstijvende functie toe te kennen. Dit omdat de sterkte van r-VVK-delen enerzijds veelal relatief laag is en anderzijds soms een relatief grote spreiding kent. Om het r-VVK heen moet nieuw VVK dan de sterkte op nemen. Bij schuifspanningen (door dwarskracht en/of torsie) geldt dat deze door zowel r-VVK als nieuw VVK mag worden opgenomen. Dit omdat schuifcapaciteit van zowel r-VVK als nieuw VVK niet vezel maar hars-gebaseerd is.

N.B: Als VVK wordt voorzien van een r-VVK binnen-deel, kan het nieuwe VVK dunner uitgevoerd worden.
N.B.: Als de schuimkern van een VVK-sandwich wordt vervangen door een r-VVK-kern, krijgt de sandwich een grotere buigstijfheid én is de afschuifvervorming nihil.

Eis 1 r-VVK: voor wat betreft (buig)trek moet nieuw VVK de belasting op sterkte alleen op kunnen nemen (de bijdrage van het r-VVK moet hierbij dus worden verwaarloosd; dit geldt niet voor stijfheid). Het nieuwe VVK moet aan de buitenzijde worden geplaatst.
Ten minste 12,5% van het totaal aanwezige nieuwe glasvezelvolume is vereist in de vier richtingen: -45°, 0°, +45° en 90°.

N.B.: Dit is ontleend aan CUR96:2017 Art 3.7.3.2 waarin voor toepassing van het vereenvoudigd rekcriterium ten minste 12,5% van het in totaal aanwezige glasvezelvolume in de vier richtingen (-45°, 0°, +45° en 90°) is vereist, bedoeld om te voorkomen dat vermoeiing, kruip, impact, onvoorspelbare belastingen en dergelijke alleen door hars worden opgenomen.

Eis 2 r-VVK: zodra het r-VVK in de hoofdrichting breekt op (buig)trek moet nieuw VVK de (buig)trek over kunnen nemen, hierbij moet worden uitgegaan van de gemiddelde (buig)breuksterkte van r-VVK die op moet worden genomen met de karakteristieke (buig)sterkte van nieuw VVK.

N.B.: Deze eis is ontleend aan 5e alinea CUR96:2017 Art 8.1 waarin bij brosse breuk van verbindingen een tweede draagweg wordt vereist.
N.B.: Dat wordt uitgegaan van de gemiddelde sterkte van r-VVK is analoog aan de gemiddeld treksterkte van beton voor het bepalen van het brosse breuk criterium 'minimum wapening'. (EN 1992-1-1 Art. 7.3.2)

Aan deze eis hoeft niet te worden voldaan indien de ontwerpspanning in het r-VVK lager blijft dan 0,50 x de karakteristieke (buig)breuksterkte of 0,25 x de gemiddelde (buig)breuksterkte van r-VVK.

Proeven voor r-VVK

Interlaminaire schuifsterkte - Secondary bonding (ILSS-SB) proeven r-VVK
ILSS-SB proeven moeten op gedrongen proefstukken worden verricht om de kans te beperken dat bezwijken op buiging maatgevend is. De ILSS-SB moeten zo veel mogelijk conform ISO of ASTM voor ILSS proeven worden verricht.

Voorts geldt vlokken aanvullend:

- vlokken verkleinen met het toe te passen verkleiningsproces;
- plaat met dikte T maken met minimaal 6 lagen vlokken op dezelfde wijze behandelen, conditioneren en verbinden als in het gekozen productieproces;
- proefstukken zagen uit plaat met B = 2·T; L = 7,5·T; ℓ = 4·T ± 0,3 mm.

Voorts geldt stroken aanvullend:

- stroken zo mogelijk halen uit de sterkste buigrichting van EoL-VVK;
- stroken verkleinen met het toe te passen verkleiningsproces;
- plaat met dikte T maken met even aantal lagen van minimaal 4 stroken op dezelfde wijze behandelen, conditioneren en verbinden als in het gekozen productieproces;
- proefstukken zagen uit plaat met B = 2·T; L = 7,5·T; ℓ = 4·T ± 0,3 mm.

Conform CUR 96 bijlage B voor bepaling van ILSS minimaal n = 6 proeven (kwaliteitscontrole) te verrichten, hiermee gemiddelde waarde en variatiecoëfficiënt bepalen. Daarmee karakteristieke waarde bepalen m.b.v. EN1990 tabel D1 voor n = 12 proefzijden. Deze vergelijken met ILSS-waarden voor nieuw VVK van CUR 96 tabel 3.18. Indien dit lager is en er een karakteristieke waarde van dit onbekende materiaal moet worden bepaald, moeten er in totaal 10 proeven worden uitgevoerd en kan tabel D1 voor n = 20 proefzijden worden gebruikt.

N.B.: Bij één ILSS-proef wordt de schuifsterkte voor de zwakste zijde bepaald, de andere zijde heeft (minimaal) dezelfde sterkte: 1 proef kent dus 2 proefzijde resultaten.

Bij ILSS-SB moet ook de buigspanning worden bepaald en worden vergeleken met de buigproeven die een grote slankheid hebben (T/ℓ = 16 i.p.v. T/ℓ = 4), zodat kan worden vastgesteld of afschuiving wel het maatgevende bezwijkmechanisme is.

N.B.: Een aanmerkelijk lagere karakteristieke waarde dan de vereiste ILSS-waarde voor nieuw VVK (bij UP-VVK: 20 N/mm^2) kan ook wijzen op het niet compatibel zijn van nieuwe hars en EoL-hars, op slechte benatting en / of slechte omstandigheden tijdens de productie zoals vocht, vet, stof of andere vervuiling dan wel gladde oppervlaktes.

Buigproeven r-VVK

Conform CUR 96 bijlage B voor bepaling van elke buigsterkte minimaal n = 20 buigproeven conform ISO of ASTM verrichten, als naast de gemiddelde waarde voor buigsterkte ook de standaardafwijking (gedetailleerde probabilistiek) moet worden bepaald.
Voor de sterkte kunnen daarmee de karakteristieke waarde en de ontwerpwaarde rechtstreeks worden bepaald m.b.v. tabel D1 resp. D2 uit EN1990.

N.B.: Er kan worden uitgegaan van normale verdeling of een lognormale verdeling. Een lognormale verdeling levert veelal gunstiger waarden op.

Als alleen de gemiddelde sterkte en de buigstijfheid als ontwerpparameters nodig zijn, betreft het minimumaantal buigproeven conform CUR 96 bijlage B minimaal n = 10 stuks voor elke onderscheidende richting.

Er geldt dat zo veel mogelijk conform ISO of ASTM buigproeven moeten worden verricht, en voorts:

- stroken of vlokken verkleinen met het toe te passen verkleiningsproces;
- plaat met dikte T maken met minimaal 3 lagen stroken of minimaal 6 lagen vlokken op dezelfde wijze behandelen, conditioneren en verbinden als in het gekozen productieproces;
- proefstukken zagen uit plaat met B = 2·T; L = 20·T; ℓ = 16·T ± 0,3 mm.

N.B.: Vanwege de verwachte toepassing in buigelementen van r-VVK zijn buigproeven voorzien in plaats van trekproeven zoals bij verificatietesten van nieuw VVK.

Verbruiksproeven r-VVK

Naast mechanische eigenschappen is het nieuwe hars volumegehalte nodig voor de werkvoorbereiding van een nieuw object. Voorts is het haalbare vezelvolumegehalte een belangrijke parameter voor de haalbare stijfheid van r-VVK.

De proefstukken moeten op dezelfde wijze worden samengesteld, behandeld, geconditioneerd en verbonden als in het gekozen productieproces.

Het glasvezelvolumegehalte en minerale vuller-volumegehalte met NEN-EN-ISO 1172 bepalen van:

- r-VVK (n=2) te weten r-VVK-glasvezel gehalte en totale hars gehalte
- EoL-VVK (n=2) te weten EoL glasvezel gehalte en EoL hars gehalte

Daarmee kunnen voor r-VVK bepaald de volumegehaltes worden bepaald van:

- glasvezel volgt direct uit test r-VVK
- EoL hars volgt direct uit test EoL-VVK
- nieuwe hars = totale hars – EoL hars

De massa van de te verassen hoeveelheid VVK moet een representatief gemiddelde opleveren van geometrische variaties van gehaltes binnen r-VVK, het aantal gram te verassen r-VVK hiertoe zo nodig hoger aanhouden dan de aangegeven range in NEN-EN-ISO 1172 voor nieuw VVK.

Kennis vezelopbouw en verkleiningsplan EoL-VVK en beproevingen r-VVK

In geval van hergebruik van stroken geldt dat van elke onafhankelijke EoL-VVK-objectdeel ILSS-SB-proeven en buigproeven moeten worden verricht. Buigproeven moeten minimaal worden verricht in de richting met de laagste buigeigenschappen. Hiervoor is kennis van de vezelopbouw nodig. In dat geval kan men uitgaan van de proefwaarden die in deze richting worden bepaald.

Het gebruik van meerdere categorieën kan interessant zijn bij meerdere, identieke EoL producten waar veel archiefkennis over beschikbaar is, en met sterke richtingsverschillen in buigeigenschappen. Te denken van aan grote series van rotorbladen van windmolens met relatief korte levensduren vanwege vermoeiing.
Als men ook uit wil gaan van categorieën met gunstiger waarden dan alleen de richting met de laagste buigeigenschappen, moet vooraf een verkleiningsplan worden gemaakt, en moet er per onderscheiden richting in dit objectdeel buigproeven worden gedaan.

Voort moeten objectdelen conform het verkleiningsplan in grote stukken gezaagd worden waarbij de grote stukken gemarkeerd worden wat betreft de strookrichting t.b.v. correcte invoer in de verkleinmachine. De grote stukken en stroken moeten per categorie tot en met de productie herkenbaar zijn.

Een logische categorisering van stroken zou de stijfheid van de stroken zijn. Voorgesteld wordt een naamgeving die refereert aan E-modulus en aan recycling met stappen van 5 GPa: r-E5, r-E10, r-E15, r-E20 etc.

5.5 Materiaalfactoren, conversiefactoren, kruip- en vermoeiingsbreuk

Materiaalfactoren zijn 1,0 voor BGT beschouwingen. Deze hoeven niet te worden bepaald voor UGT-beschouwingen als voor r-VVK wordt uitgegaan van rekenwaarde die rechtstreeks wordt bepaald, zie §5.1.

Voor conversiefactoren (temperatuur, water(damp), kruip en vermoeiing) alsmede kruipbreuk en vermoeiingsbreuk geldt:

Als conversiefactoren voor r-VVK delen mogen de conversiefactoren voor gelijmde verbindingen worden bepaald en aangehouden (zie CUR 96:2017 Art. 8.2.1. en 2.4.5.6).

Temperatuur en water(damp)

Voor r-VVK delen die a) binnen een nieuwe VVK-schil worden toegepast die de trek van r-VVK na breuk kan overnemen en b) met een compatibele hars worden verlijmd, de conversiefactor voor temperatuur en voor water(damp) voor nieuw VVK kan worden aangehouden. Met dien verstande dat voor temperatuur ook in de bruikbaarheidsgrenstoestand altijd 0,9 moet worden aangehouden om de T_g van r-VVK niet te hoeven achterhalen of te bepalen.

N.B.: Dit op basis van engineering assessment: a) eenvoudigheid halve, b) omdat het alleen de BGT betreft en c) ondersteunt met literatuur over goed geselecteerde harsen voor VVK-lijmverbindingen (S. Budhea, 2017).

N.B: Daarbij geldt dat de r-VVK-toepassing kleur en klimaat-compatibel moet zijn met de EoL toepassing: zie hiertoe §5.2.

Vermoeiing

De stijfheid van r-VVK delen lijken niet gevoeliger voor herhaalde belasting dan nieuw VVK, derhalve kan als eerste schatting dezelfde conversiefactor worden aangehouden als voor nieuw VVK.

N.B.: Dit blijkt in elk geval voor de buigproef met 1.000 belasting cycli die is gedaan op een proefstuk met gezaagde stroken (zie §5.3). Voor nieuw VVK moet 0,90 worden aangehouden tot 5.000 cycli, in de proef werd 0,96 bereikt bij 1.000 cycli (en na 100 cycli 0,98 voor zowel r-VVK als nieuw VVK).

Kruip

De r-VVK delen (binnen een nieuwe VVK-schil) mogen niet worden meegenomen bij langeduur stijfheid.

N.B.: Om kruip(vervorming) te beperken zijn doorlopende vezels in de belastingrichting geschikt. r-VVK is te gevoelig voor het juist gericht verkleinen en/of juist richten van lamellen met vezels in de langduur belastingrichting. Bovendien betreffen r-VVK delen altijd onderbroken vezels.

Kruipbreuk De r-VVK delen (binnen een nieuwe VVK-schil) mogen niet worden meegenomen bij langeduur sterkte.

N.B.: Dit om dezelfde redenen als bij kruip(vervorming).

Vermoeiingsbreuk De r-VVK delen (binnen een nieuwe VVK-schil) mogen niet worden meegenomen bij de vermoeiingssterkte.

N.B.: Dit om te voorkomen dat de belasting geschiedenis bekend moet zijn.

5.6 Aanbevelingen voor het ontwerp

Vermalen vlokken

Met vermalen vlokken wordt een grote mate van vormvrijheid verkregen voor toepassing in nieuwe producten. Nadeel is dat er veel nieuwe hars nodig is om de vlokken te verbinden, met als gevolgen:

- hoog gehalte nieuwe hars en laag gehalte recyclaat (nadeel in kosten & duurzaamheid)
- lage buigsterkte en buigstijfheid (vezel gerelateerd)
- hoge afschuifsterkte (hars gerelateerd)

N.B.: Bij het project "Dekplanken Dinzerbrug" van Provincie Friesland zijn vermalen vlokken gemengd met zand. Het zand dient voor het vullen van de holtes tussen de recyclaatvlokken waardoor er minder hars nodig is. Daarnaast is hier blended hars toegepast met 25% biocomposiet hars. (Bijker, Tromp, & Siereveld, 2019)

In het streven naar een laag aandeel nieuwe hars is in dit RAAK-onderzoek de toepassing van recyclaat stroken bekeken.

Geknipte stroken

Stroken die met een shredder zijn geknipt uit vlak of gekromd VVK, kunnen worden toegepast als onderdelen van VVK-constructies die:

- willekeurig gekromd (of vlak) moeten worden
- de constructie verstijven voor korte duur belasting
- massief moeten zijn.



Figuur 5.15 Shredder geknipte stroken

De bijbehorende verkleinmachine die de stroken kan knippen is ontwikkeld in werkpakket 2, zie Figuur 5.15 en Hoofdstuk 2.

Bij toepassing van deze shredder met een straal r van scharende shredder rol bleek dat bij platen met een dikte van d = 4 mm die in een strooklengte van 150 mm werden geknipt dat vele stroken in het midden werden geknakt. Naar verwachting heeft het al dan niet knakken met de verhouding d/r te maken. Het constant aanpassen van diameter aan plaatdikte is lastig.

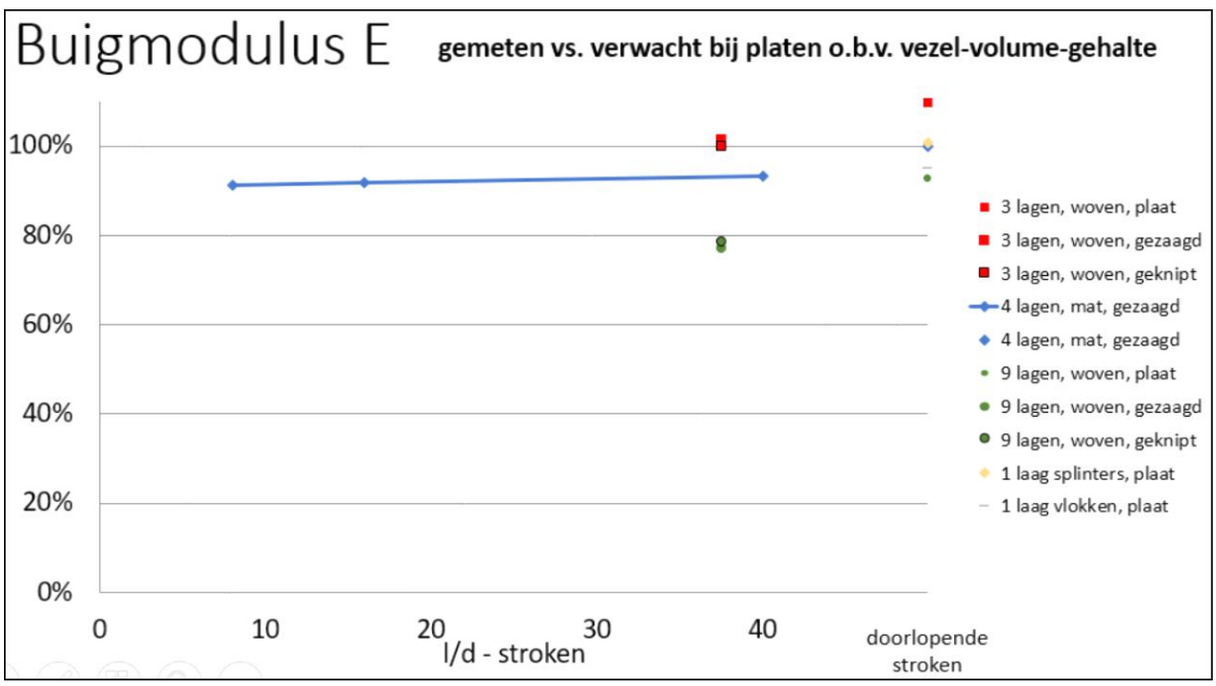


Figuur 5.16 Geknipte stroken in mal

Doordat de stroken rafelig en veelal geknakt zijn is het lastig om stroken in meerdere lagen te stapelen, zie *Figuur 5.16.*

Uit proeven met hergebruikte geknipte VVK-stroken blijkt dat deze ten opzichte van kunststof: wel stijver, maar niet sterker zijn.
Mits rekening wordt gehouden met extra matrix tussen en rondom de VVK stroken in zowel lengte-, dikte- als breedterichting, kan voor de kortduur stijfheid van het gerecyclede VVK als eerste schatting worden uitgegaan van 90% van de stijfheid van het ingangsmateriaal, zie *Figuur 5.11*. Uitgegaan is hierbij van stroken met een l/d ratio van minimaal 10, en dat de stroken verspringend worden aangebracht in zowel lengte-, dikte- als breedterichting.

Voor de gemiddelde scheursterkte van het gerecyclede VVK kan bij geknakte stroken van bi-directionele lamellen als eerste schatting worden uitgegaan van de sterkte van on-versterkt kunststof, zie Tabellen 5.4 & 5.5.



Figuur 5.17: Vergelijking E-modulus met verwachte waarde bij platen

Gezaagde stroken

Stroken die zijn gezaagd uit vlak of constant gekromd VVK, kunnen gemakkelijk worden toegepast als onderdelen van VVK-constructies die:

- evenzo vlak of identiek constant gekromd moeten worden
- de constructie verstijven én versterken voor kortduur belasting
- massief moeten zijn.

Uit proeven met hergebruikte gezaagde VVK-stroken blijkt dat deze ten opzichte van kunststof: zowel stijver als sterker zijn.



Figuur 5.18: Gezaagde versus geknipte VVK stroken (in het midden geknakt).

Om de mechanische eigenschappen zo hoog mogelijk én om de kosten zo laag mogelijk te houden, zijn gezaagde stroken gunstiger dan geknipte VVK stroken, omdat gezaagde stroken:

- regelmatige afmetingen hebben en niet geknakt zijn
- minder hars nodig hebben bij het recyclen (dichter gestapeld)
- makkelijker te stapelen zijn
- langer doorlopende vezels hebben.

Zie tevens *Figuur 5.18.*

Voor de bijbehorende verkleinmachine kan inspiratie worden opgedaan bij een broodsnijmachine, zie *Figuur 5.19*.



Figuur 5.19 Gezaagde stroken inspiratie

Als ook rekening wordt gehouden met extra matrix tussen en rondom de VVK stroken in zowel lengte-, dikte- als breedterichting, kan voor de kortduur stijfheid van het gerecyclede VVK als eerste schatting worden uitgegaan van 90% van de stijfheid van het ingangsmateriaal, zie Figuur 5.11. Uitgegaan is hierbij van stroken met een l/d ratio van minimaal 10, en dat de stroken verspringend worden aangebracht in zowel lengte-, dikte- als breedterichting.

Voor de gemiddelde scheursterkte van het gerecyclede VVK kan bij gezaagde stroken van bi-directionele lamellen als eerste schatting worden uitgegaan van 175% van de sterkte van on-versterkt kunststof, zie Tabellen 5.6 en 5.7.

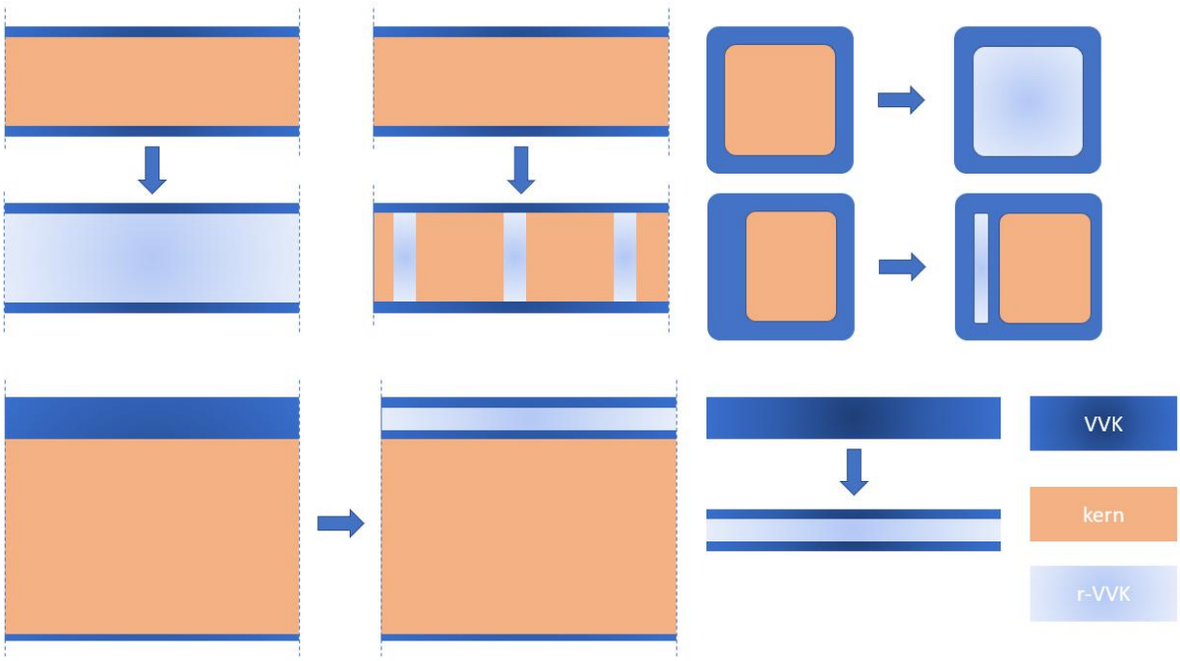
Voorbeelden

In *Figuur 5.20* zijn voorbeelden gegeven van vervanging van kunststofschuim kern door r-VVK-kern, en van vervanging van een binnen-gedeelte van dik VVK door r-VVK.
Vervanging van de kunststofschuimkern resulteert in:

- \- vergroting eigen gewicht kern (PUR bijv. 50 kg/m^3) tot r-VVK (1.500 kg/m^3)
- \+ vergroting afschuifsterkte kern (PUR: 1 N/mm^2) tot r-VVK-ILSS-SB (10 à 20 N/mm^2)
- \+ voorkoming afschuifvervorming
- \+ beperking buigvervorming
- \+ facilitering houvast voor inserts / mechanische verbindingsmiddelen
- \+ minder hol geluid bij passage van voertuigen
- \+ beperkter toepassen van nieuwe, doorlopende vezels: alleen waar deze nodig zijn voor draag- en samenhangfunctie

Vervanging van een binnen-gedeelte van dik VVK door r-VVK resulteert in:

+ grote mate van behoud van afschuifsterkte r-VVK binnen-deel t.o.v. VVK met UP
+ behoud van afscherming tegen delaminatie VVK-kern interface door impactbelasting
+ beperkter toepassen van nieuwe, doorlopende vezels: alleen waar deze nodig zijn voor draag- en samenhangfunctie



Figuur 5.20 Mogelijkheden voor toepassing r-VVK.

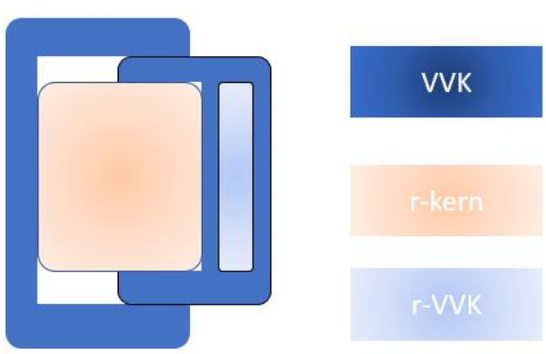
Deze voorbeelden maken duidelijk dat bij hergebruik van r-VVK vooral gedacht moet worden aan relatief dikke en of massieve producten, zoals de volgende producten voor de (grond- weg- en water)bouw:

-	Balken voor remmingwerken	afmeren schepen	massief voor scheepsimpact
-	Balken voor geleidewerken	geleiden schepen	massief voor scheepsimpact
-	Brugdek (planken)	rijden verkeer	massief voor impact vallend lading / geluid
-	Beschoeiingen	steile waterkant	massief voor inbrengen
-	Rijplaten	rijden hijskranen	massief voor puntlasten

Zie ook de demonstrators in Werkpakket 3 (hoofdstuk 4).

Er kan ook gedacht worden om naast massief r-VVK ook gerecycled kunststofschuim uit thermoplasten toe te passen, bijvoorbeeld van gemengd plastic huisafval. Daarmee kunnen constructiedelen bewust ten opzichte van elkaar gedempt worden, om bijvoorbeeld impactenergie flexibel op te nemen.

-



Figuur 5.21 Mogelijkheid voor hybride toepassing r-VVK.

6. Business Case – zowel economisch als in duurzaamheid

6.1 Introductie Werkpakket 5

Naast al het technische werk dat nodig is om de industrialisatie van het principe van Hergebruik van Composiet aan te tonen, is de afgelopen twee jaar ook tijd besteed aan de business case om de financiële en ecologische haalbaarheid van het principe te onderzoeken. Als een goede business case niet mogelijk is, is industrialisatie nutteloos. Binnen dit werkpakket is daarom een rekentool ontwikkeld om de financiële haalbaarheid te onderzoeken.

Binnen het project is verder een indicatieve studie verricht om de carbon footprint van het nieuw te genereren End-of-Life (EoL) composietmateriaal te kunnen inschatten. Hierbij is de nadruk gelegd op vergelijk met andere composietmaterialen en het effect van het percentage EoL vlokken.

6.2 Financiële haalbaarheid

Om een sluitende business case te krijgen voor het principe Hergebruik van EoL composiet, heeft het projectteam de filosofie gehanteerd dat de uiteindelijk te produceren composiet delen toegevoegde waarde moeten hebben in hun eindgebruik. Omdat we hier te maken hebben met End-of-Life composietmateriaal, met minder chique woorden: een constructiemateriaal gemaakt van afval, is de neiging om nieuwe eindtoepassingen te gaan zoeken aan het lagere eind van performance spectrum.

Bewust is hier niet voor gekozen. Low performance materialen worden vaak verwerkt tot producten met een lage marge wat de business case voor producten gemaakt van EoL composiet niet ten goede zal komen. Daarnaast is het ook niet terecht om aan de low end kant van het spectrum te gaan zitten. Het EoL composietmateriaal is juist gebaseerd op het behoud van de goede eigenschappen van het oude composiet, namelijk een goede waterresistentie en mechanische stijfheid en sterkte, het materiaal heeft dus wat te bieden.

In een eerder stadium is door het lectoraat een studie gedaan naar mogelijke toepassingen van het principe van EoL composiet (ten Busschen et al., 2016). Uitkomst was dat vooral producten uit de weg- en waterbouw geschikt zijn voor de EoL methodiek in verband met het relatief hoge gewicht van de nieuwe composiet delen en de beperkte mogelijkheden om complexe vormen te genereren – dit in tegenstelling tot de standaard productie van composiet delen waarbij lag gewicht en grote vormvrijheid juist één van de voordelen is. Gebaseerd op de uitkomsten van die studie is er voor gekozen om de business case uit te werken voor damwanden of oeverbeschoeiingen, profielen die een oever of waterkant beschermen tegen bijvoorbeeld afkalven. Bijkomend voordeel van deze keuze was dat in een eerdere studie van het lectoraat onderzoek is gedaan naar de productie van EoL oeverbeschoeiingen en het intrillen (Guravage, 2017). Binnen het RAAK-project zijn aan de hand van deze studies handmatig met behulp van vacuüm infusie planken geproduceerd en zijn uiteindelijk ook daadwerkelijk geplaatst bij de Beatrix sluis in Almere. Uit dit onderzoek is waardevolle data gekomen over de mogelijkheden, de precieze afmetingen en samenstelling van een dergelijk eindproduct en hun performance.

Voor het beoordelen van een business case voor EoL composiet producten, is daarom een model opgesteld gebaseerd op EoL oeverbeschoeiingen waarbij de keuze voor de ingevoerde parameters hieronder wordt beschreven.

6.2.1. Parameters van invloed op de business case

Handmatig vs. geautomatiseerd

De oeverbeschoeiingsplanken van 3,5 meter die het team heeft geproduceerd voor de Beatrix sluis in Almere, waren met de hand vervaardigd met behulp van vacuüm infusie. Het produceren van 80 van deze planken van 3,5 meter lengte (dus in totaal 280 meter) heeft 720 manuur in beslag genomen (3 personen, 6 uur per dag, 40 werkdagen). Het aantal manuren was daarmee binnen het project de grootste kostenpost (720 x 40 €/uur = 28.800 €), vele malen groter dan de grondstofkosten (80 x 74 € RMC/plank = 5.920 €, zie Hoofdstuk 3). Met deze productiemethode bleek bovendien maar 50 wt% EoL materiaal in de oeverbeschoeiingsplanken verwerkt te kunnen worden.

Met deze getallen is meteen duidelijk dat de business case voor handmatig verwerken van EoL composiet zoals tóen uitgevoerd, niet gaat vliegen. Ter vergelijk: Azobe beschoeiingsplanken worden voor 55 euro per m^2 verkocht. De Beatrixsluis planken die bijna 1 m^2 per plank in oppervlakte waren, hebben aan RMC en manuren ((28.800+ 5.920/80 =) 434 € per plank gekost, zonder marge, zonder kosten voor productielocatie etc.

De eerste belangrijkste conclusie die daarom uit deze studie voor dit product getrokken kon worden was:

'Handmatige verwerking kost te veel tijd en is daarmee te duur.'

Hiermee viel de keuze voor het uitwerken van de business case op geautomatiseerde productiemethoden. In hoofdstuk 3 is een voorbeeld uitgewerkt van "push-pultrusie". Binnen de composiet industrie is pultrusie een welbekende continue vormgevingstechniek voor profielen.

Een rekenvoorbeeld ter vergelijk: een pultrusie-lijn zou voor een dergelijk profiel een snelheid van 15 m/u moeten kunnen halen, waarmee de productie van 80 planken van 3,5 meter uitkomt op 18,7 uur totaal. Dit is een enorm verschil met de bovenstaande case. Daarnaast dient nog opgemerkt worden dat één operator meerdere machines kan bedienen, wat de business case nog meer de goede kant uit duwt.

Grondstofkosten EoL

In de industrie wordt voor volledig geautomatiseerde productie zoals pultrusie vaak de vuistregel gehanteerd: 1/3^e RMC, 1/3^e productiekosten, 1/3^e marge. Hiermee werd het belang van lage RMC uit het voorbeeld van de Beatrixsluis oeverbeschoeiingen nogmaals zichtbaar in vergelijk met Azobe. Alhoewel de grondstofkosten nog niet eens de grootste kostenpost waren, ze waren nog steeds aanzienlijk, namelijk 74 €/plank terwijl in deze berekening ook nog eens de aanname zit dat de kosten van het EoL materiaal 0 €/kg is. Rechtvaardiging van deze prijs is dat de kosten die zouden moeten worden betaald om het EoL composiet te laten verwijderen, worden aangewend voor de productiekosten van de vlokken.

Waar 3 jaar geleden voor het verwijderen van oud composiet 100 €/ton moest worden betaald, is dit recentelijk gestegen tot 200 €/ton en volgens meest recente informatie lijkt het zelfs nog verder te zijn gestegen. Uitsparen van deze verwijderingskosten zal zeker kostendekkend zijn voor het maken van de vlokken uit EoL composiet producten.

Om de grondstofkosten te drukken is het dus gewenst om het gehalte EoL vlokken zo hoog mogelijk te maken en zo min mogelijk virgin grondstoffen te gebruiken. Bij de infusie van de oeverbeschoeiingsplanken voor de Beatrixsluis kon maximaal 50 wt% EoL vlokken in het nieuwe materiaal verwerkt worden. Na evaluatie is echter de conclusie getrokken dat in de laminaatopbouw nog winst te behalen viel en dat het technisch mogelijk is om een hoger percentage EoL in de profielen te verwerken mits met een geautomatiseerde productielijn als pultrusie gewerkt wordt.

Samengevat waren de conclusies voor het model;

-EoL materiaal heeft RMC van 0 €/kg
-Binnen het model moet gespeeld kunnen worden met het gehalte EoL materiaal
-Voor de virgin grondstoffen zal de marktprijs gehanteerd worden

Prijsaanname EoL profielen

De marktprijs van de EoL profielen zal bepalend zijn voor het slagen van de business case.

Vanwege de goede vocht bestendigheid van het EoL materiaal wordt een langere levensduur verwacht dan traditionele houten profielen. Op basis van die levensduur is projectpartner Waterschap Zuiderzeeland benaderd om een mogelijke meerprijs te achterhalen voor EoL composiet profielen ten opzichte van traditionele materialen. Deze bleek voor oeverbeschoeiingen in de aanvangsfase een factor 1,3 te zijn, gerechtvaardigd door de besparingen op lange termijn. Dit is gunstig maar er mag verwacht worden dat op de langere termijn de hoogte van de meerprijs ter discussie komt te staan en deze factor nog hoger wordt.

Binnen het model moet gevarieerd kunnen worden met deze prijsfactor.

Aannames over het oeverbeschoeiingsprofiel

De aannames over het te produceren profiel kwamen wederom uit de case van de planken voor de Beatrix-sluis. De aangeleverde EoL vlokken bestaan deels uit hand gelamineerd composiet met een glasgehalte van ongeveer 35 wt%, deels uit met infusie geproduceerd composietmateriaal met een 65 wt% glas gehalte. Grofweg bestaan de vlokken daarom dus voor 50/50 uit glas/hars.

In dezelfde case is ook virgin materiaal verwerkt, wederom in een glas/hars verhouding van 50/50.

Samenvattend leidde dat tot de volgende aannames:

-Het soortelijk gewicht van de profielen is gezet op 1,8 kg/dm^3
-De virgin grondstoffen nodig voor de productie van de EoL profielen bestaan 50/50 glas/UPR hars
-Het gewicht van de planken is 50 kg/m^2 (afhankelijk van breedte en dikte)

Verklaringen overige aannames

De rest van het model omvat de periferie die hoort bij een opstartlocatie met 1 geautomatiseerde productielijn en een kleine organisatie voor de productie en de verkoop van de profielen. Gedacht moet worden aan zaken als de afschrijvingstermijn van de productielijn, de initiële investeringskosten, maar ook de machine-aannames. Als deze operatie geïntegreerd kan worden in een bestaande productie omgeving (bijvoorbeeld bij een bestaand pultrusiebedrijf) zal een aantal kostenposten lager uitvallen (huurkosten, logistieke kosten, verkoop- en managementkosten en optimalisatie van inzet operators).

Voor de machine is een output gezet van 2,3 liter/min, waarbij is uitgegaan van een productiesnelheid van 15 m/u zoals geschat voor een commerciële pultrusielijn en 1m^2 per plank van 3,5 m lengte.

Omdat dit een volledig geautomatiseerde lijn betreft, is het aantal machine uren per jaar op 3400 u/a gesteld. Dit is aan de voorzichtige kant maar gerechtvaardigd voor een opstartlocatie. Volledige inzet van de machine zou (365 x 24 =) 8760 uur zijn. Twee shifts van elk 8 uur gedurende 300 werkdagen komt op 4800 u/a.

Om veiligheidsredenen bestaat een ploeg uit twee personen. Dit is een zware bemanning voor één enkele lijn en gaat tegen het principe in van een geautomatiseerde productie waar het eigenlijk de bedoeling is dat één persoon meerdere lijnen bedient. Bij het opschalen naar meerdere productielijnen, of integratie in een bestaande productie installatie, kan dit ongunstige effect worden weggestreken.

6.2.2 Tool

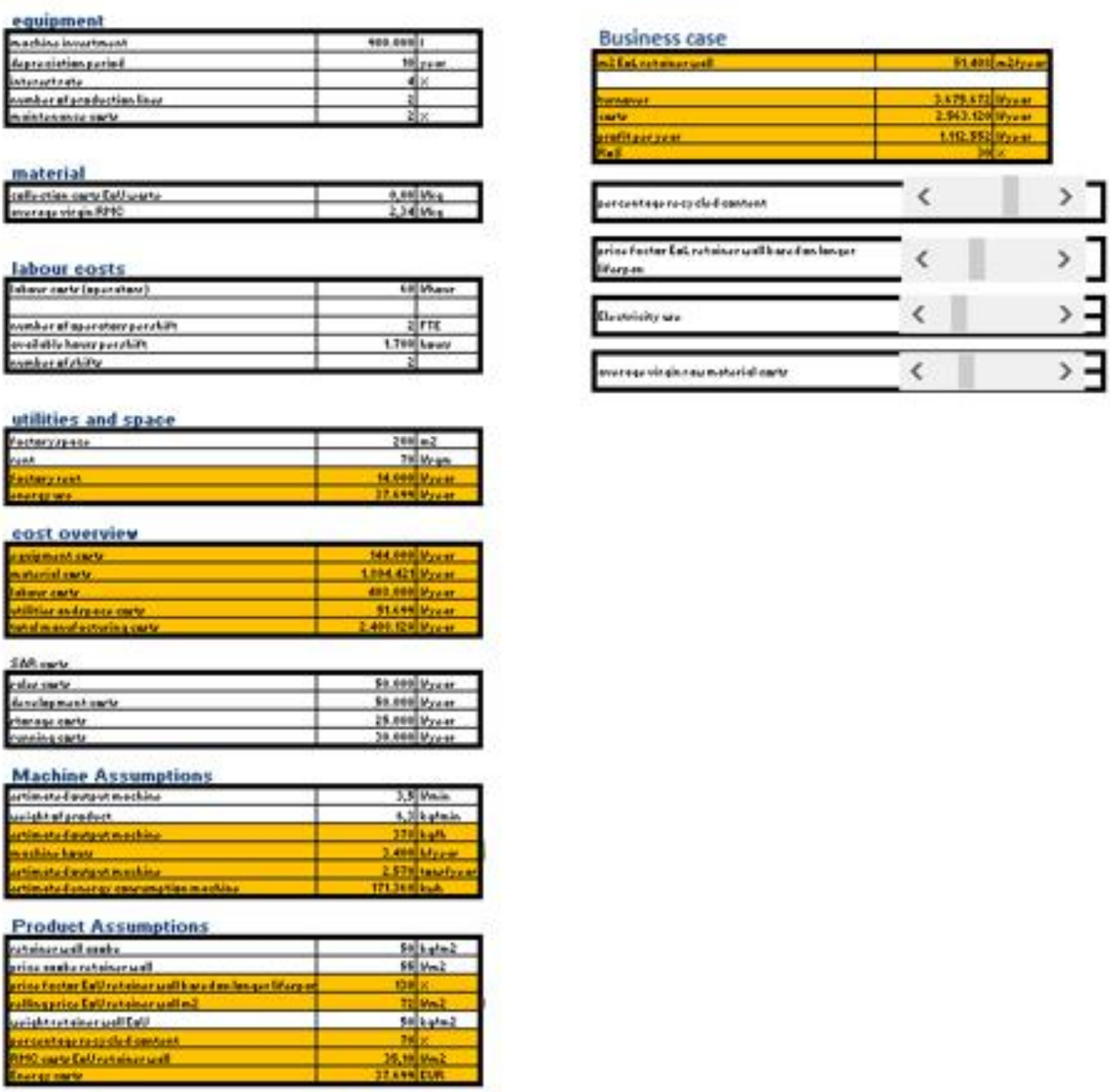
Aan de hand van bovenstaande is een tool opgezet in Excel voor het beoordelen van de financiële kant van de business case voor deze continu geproduceerde profielen, zie Figuur 6.1. Het gaat om een simpele tool waar velden aangepast kunnen worden om het effect ervan op de business case te kunnen beoordelen. Binnen de tool kunnen de volgende velden worden onderscheiden:

de input –bevat zaken omtrent de investeringen, de productielocatie zelf, de materialen

de aannames – bevat de parameters die betrekking hebben op de machine en het te maken product

de resultaten – de uitkomsten van de financiële business case

een gevoeligheidsanalyse – door middel van vier schuifjes zijn vier parameters ondergebracht waar vaak naar gevraagd wordt bij het beoordelen van de business case, namelijk het gewichtspercentage EoL, de prijs factor, energie- en gemiddelde grondstofkosten. Door de schuifjes te verplaatsen wordt in het resultaten veld direct zichtbaar wat het effect is op de winstgevendheid.



Figuur 6.1: Tool voor het beoordelen van de business case

6.2.3 Uitkomsten en overwegingen van de Business Case

Twee zaken vallen op als met het model gevarieerd wordt. Sommige parameters hebben heel weinig invloed op de business case, andere enorm veel.

Energiekosten hebben nagenoeg geen effect op de business case. Simpel gezegd, daar zitten de kosten niet in.

De totale grondstofkosten daarentegen hebben wél veel invloed zoals ook al bleek uit de oeverbeschoeiingen die voor de Beatrixsluis geproduceerd werden. Deze hangen nauw samen met het gewichtspercentage EoL materiaal, immers hoe meer gratis EoL, hoe minder virgin grondstoffen nodig zijn. Het percentage EoL heeft daarom een enorme invloed op de winstgevendheid. Het valt op dat om quitte te kunnen draaien bij een gemiddelde prijs van de virgin grondstoffen van 2,4 €/kg, een percentage van 70% EoL vlokken ingebouwd moet worden. Dit is niet onmogelijk, het ligt zelfs binnen handbereik met pultrusie maar het is een belangrijke conclusie.

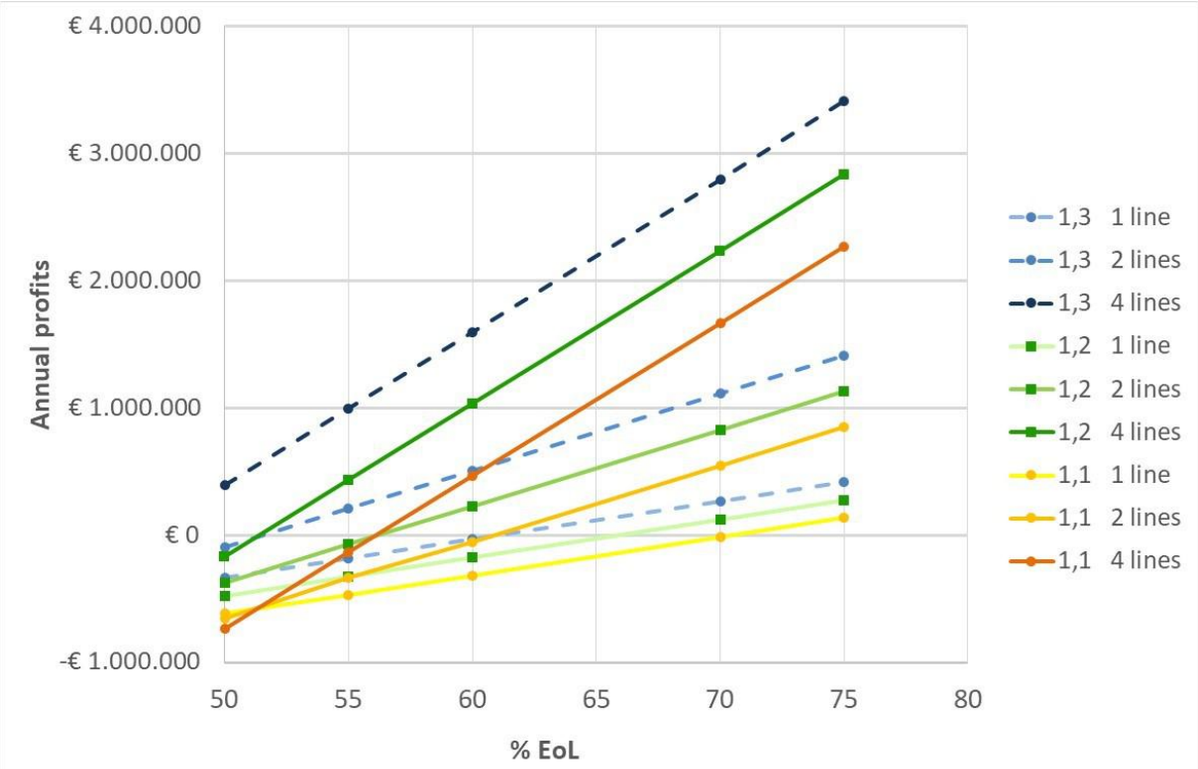
Deze berekening laat ook zien dat het relatief hoge gehalte virgin materiaal geen ruimte overlaat om te spelen met duurdere hars- en glastypes. Pas vanaf de 80% EoL wordt het systeem ongevoelig voor de virgin RMC. Dit lag anders bij het eerder door het lectoraat ontwikkelde rHPL materiaal, waar in sommige gevallen maar 10% virgin hars verwerkt hoefde te worden, wat de deur openzet om bijvoorbeeld duurdere poly-urethaan harsen in te zetten.

Wat praktisch geen invloed heeft op de business case, zijn de initiële investeringen. Wat wél invloed heeft, is het aantal mensen per shift. In die zin is het dus gunstig om uit te breiden met meer productielijnen zodra de afzetmarkt goed is. Waarschijnlijk kan tot 5 productielijnen met dezelfde hoeveelheid productiemedewerkers per shift gewerkt worden, wat de business case ten goede komt.

Hetzelfde geldt dan voor de machine-uren. Omdat het aantal mensen meeweegt in de berekening, zijn meer machine-uren oftewel een hogere productiviteit van de productielocatie als geheel, gunstig voor de business case. Als de dubbele shift volledig benut wordt en het aantal machine uren omhooggaat naar 4800 uur, schiet de winstgevendheid al omhoog.

Onderstaande grafiek (winstgevendheid vs. percentage EoL) vat één en ander samen voor verschillende aantallen productielijnen (1, 2, 4 stuks) tegen verschillende prijsfactoren (1,3; 1,2; 1,1).

- hoe meer EoL vlokken in het profiel verwerkt wordt, hoe winstgevender de productielocatie kan zijn
- hoe hoger de prijsfactor, hoe winstgevender de productielocatie kan zijn
- zelfs met een prijsfactor van 1,1 kan nog winst behaald worden, mits geproduceerd wordt met meer dan één pultrusielijn



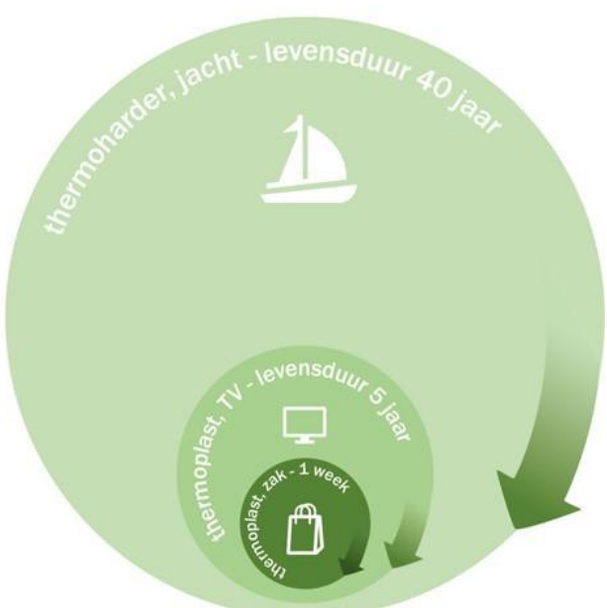
Figuur 6.2: Winst per jaar als functie van het EoL percentage. Variabelen zijn het aantal productielijnen en prijsfactor

Samenvattend, met alle aannames die ingebouwd zitten, lijkt er onder de juiste condities muziek te zitten in de financiële kant van de business case.

6.3 LCA

Vergeleken met de thermoplast kunststofindustrie waar recycling van afval een lastige maar niet onoverkomelijke zaak is, werd de thermoset composiet industrie er jarenlang op aangekeken dat het materiaal totaal niet recyclebaar was omdat het matrix materiaal niet omgesmolten kan worden en teruggewonnen vezels hun hechtvermogen met nieuw matrix materiaal hebben verloren (Thomson et al., 2016). Wat eigenlijk de charme is van het thermoset composietmateriaal (lange levensduur, weinig onderhoud), wordt aan het eind van zijn leven een valkuil (niet conventioneel recyclebaar).

Niet recyclebaar betekent echter niet dat het materiaal zijn carbon footprint niet kan *verdienen*, de extreem lange levensduur en het beperkte onderhoud van thermoset composiet zorgen toch vaak voor een goede carbon footprint vergeleken met traditionele materialen.



Figuur 6.3: LCA

Om de cirkel desondanks toch rond te krijgen, is het Windesheim principe van EoL composiet ontwikkeld: deze methodiek maakt gebruik van de goede eigenschappen van het oude composietmateriaal (hoge sterkte en waterbestendigheid) om het opnieuw leven in te blazen als basis voor nieuw constructiemateriaal. Het materiaal krijgt hierdoor de kans om voor een *tweede keer* zijn carbon footprint te verdienen.

6.3.1 Tool keuze: EcoCalculator EuCIA

Het berekenen van de carbon footprint van een composiet deel – liefst over zijn totale levensduur – is een gecompliceerde exercitie. Vaak is er binnen een dergelijke berekening een grote hoeveelheid aan onbekende parameters en een cascade van aannames die op elkaar van invloed zijn. Een deel van het probleem ligt meestal al in het achterhalen van de juiste input voor de bouwblokken als hars en glas; het vrijgeven van de exacte CO_2 equivalenten ligt vaak erg gevoelig bij de leveranciers maar even zo vaak is de carbon footprint ook gewoon nog niet bekend, soms ook omdat de grondstofleveranciers van de harsfabrikanten nog niet hun berekeningen hebben gedaan. Ook kan er een verschil zitten in de carbon footprint tussen materialen die wezenlijk hetzelfde zijn, maar van andere leveranciers komen omdat de producenten andere toeleveranciers hebben en/of andere productiemethoden. De volgende hordes die dan genomen moeten worden in het berekenen van de carbon footprint zijn dan het productieproces, de precieze levensduur, de afschattingen van onderhoud en eventuele mogelijkheden om het materiaal weer opnieuw te verwerken als het zijn einde levensduur heeft bereikt.

De Europees overkoepelende branchevereniging van de composiet industrie EuCIA heeft geprobeerd een aantal van de bovenstaande hordes weg te nemen door een generieke tool te laten ontwikkelen, de 'Eco Impact Calculator' (http://ecocalculator.eucia.eu). Met deze tool kan de environmental impact berekend worden van composiet delen van crade-to-gate, letterlijk: van grondstof tot het composiet de poort verlaat. De tool bevat een gedefinieerde set aan materialen en productieprocessen waaruit gekozen kan worden. De database waarop de tool is gebaseerd (verschillende harstypes, glastypes, additieven en verwerkingsmethoden) is afkomstig van daadwerkelijk berekende industrie gemiddelden en geeft daarom een goede indicatie van de carbon en eco footprint.

Het is een relatief eenvoudige tool waarin echter de levensduur, daar waar het composiet vaak juist zijn carbon footprint verdient, jammer genoeg niet is meegenomen. Het is echter ook erg lastig om daar een betrouwbare uitspraak over te doen, omdat de productiekwaliteit van een composiet deel meespeelt in zijn totale mogelijke levensduur. Daarnaast zal de milieu impact van het composiet deel tijdens de levensduur zeer verschillend zijn per toepassing: een licht composiet deel in een vliegtuig (dynamische toepassing: lager energieverbruik) heeft veel meer positieve bijdrage dan een composiet deel in een brug (statische toepassing).

Omdat de EcoCalculator tool alle noodzakelijke gegevens bevat over glas, hars, vulmiddelen en pultrusie, is toch besloten om deze tool te gebruiken voor een indicatieve studie. Binnen dit werkpakket kan dus alleen achterhaald worden of de methodiek voor EoL composiet de juiste kant uitgaat wat betreft de carbon footprint ten opzichte van andere composiet profielen.

6.3.2 Parameters - aannames

In 6.2 is gebleken dat industrialisatie alleen een kans maakt met een geautomatiseerde productielijn. De hoofdmoot van de berekeningen is dan ook uitgevoerd met "pultrusion" als 'predefined process', daar waar met vacuüm infusie is gewerkt is uiteraard gekozen voor "resin infusion".

In het opgezette model bleken de kosten van de virgin grondstoffen bepalend voor het slagen van de business case. Daarnaast is in de productie van de oeverbeschoeiingen voor de Beatrixsluis gebruik gemaakt van DCPD-hars. Om die redenen is als input parameter 'resin' voor "UP-resin (DCPD based)" gekozen, tenzij anders vermeld.

Bij de productiemethode vacuüm infusie is als 'fiber reinforcement' gekozen voor 'Glass fibre mats' Binnen het productieproces pultrusie wordt een continue vezelversterking gebruikt. Daarom is bij de generieke berekeningen voor deze productiemethode als input parameter 'fiber reinforcement' gekozen voor "Glass Fibre Direct Roving". Hiermee wordt de buitenkant van het profiel gemaakt. Verderop in de studie is gekozen voor een gecombineerde vezelversterking. Dat staat dan aangegeven in de tabel.
Bij de productiemethode vacuüm infusie is een glas/hars verhouding gehanteerd van 40/60 wt%. Bij pultrusie van virgin materialen werd een verhouding van 65/35 wt% gehanteerd, tenzij anders vermeld. Bij het verwerken van EoL vlokken bij pultrusie werd de verhouding glas/hars voor de virgin materialen gezet op 50/50. Normaal ligt die verhouding voor pultrusie veel hoger, maar er is op deze manier geprobeerd rekening te houden met het benatten van de vlokken.

Omdat het EoL materiaal als een inert vulmiddel in het laminaat zit en dit een materiaal is wat de tool niet als keuze-optie bij 'filler' heeft staan, is uit de beschikbare opties van de tool "Sand" geselecteerd om het EoL materiaal te vertegenwoordigen. Voor deze verkennende berekening is nog een tweede aanname gedaan omtrent het EoL vlokken materiaal. Omdat de milieu impact ervan niet bekend is, is ervoor gekozen om de productie van de vlokken niet mee te nemen maar dat weg te strepen tegen de carbon credits die het hergebruik van het EoL materiaal zou geven.

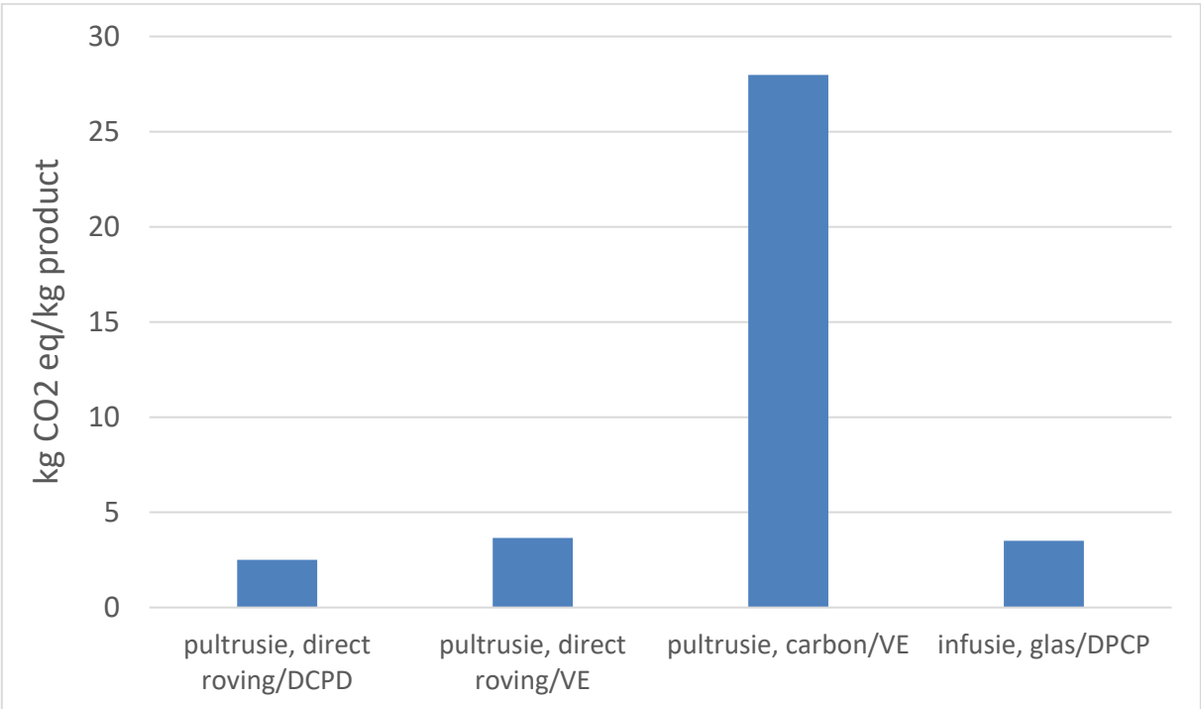
De functionele eenheid wordt per geval aangeduid en tot slot is er, inherent aan de tool, alleen cradle – to – gate berekend, dus zonder een langere levensduur erbij te betrekken. Dit is een conservatieve benadering.

6.3.4 Vergelijkingen – proces

Uit de business case is duidelijk naar voren gekomen dat deze positief uitvalt wanneer pultrusie als productiemethode wordt gebruikt, vergeleken met negatief voor vacuüm infusie.

Om gevoel te krijgen voor de verschillen in carbon footprint bij verschillende productiemethoden voor composiet profielen, is een aantal berekeningen uitgevoerd in de Eco Impact Calculator tool voor het produceren van 1 kg product (functionele eenheid), zie Figuur 6.4. Dit betreft een product geheel gemaakt van virgin grondstoffen, waar dus géén EoL materiaal in is betrokken.

Afhankelijk van de hoeveelheid vezelversterking, kan berekend worden dat het produceren van 1 kg gepultrudeerd materiaal varieert van 2,6-2,4 kg CO_2/kg product (60-70wt% glas direct roving, DCPD-hars). Daarbij moet opgemerkt worden dat meer dan 70% van de carbon footprint afkomstig is van de grondstoffen en dat hoe hoger het glasgehalte, hoe gunstiger de carbon footprint. Dit stijgt naar 3,65 kg CO_2/kg product als gebruik gemaakt wordt van vinylester hars (65wt% glas direct roving, VE-resin) of zelfs naar 27,98 kg CO_2/kg product wanneer gebruik gemaakt wordt van koolstof vezel (65wt%, VE resin). In de literatuur is relatief weinig te vinden van de carbon footprint van gepultrudeerde profielen, waarden variërend van 2,6-6,7 kg CO_2/kg *) zie https://pdfs.semanticscholar.org/60c4/8b8fda418ad0cd918c6c86fd57fb745532f6.pdf, zie https://www.jstage.jst.go.jp/article/irspsd/1/4/1_13/_pdf/-char/en en zie http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.893.5802&rep=rep1&type=pdf kunnen worden gevonden afhankelijk van wat voor ingangsbron gebruikt wordt.



Figuur 6.4: Carbon footprint per kg geproduceerd materiaal, pultrusie vs. vacuüm infusie. Alleen virgin grondstoffen.

Ter vergelijk: wordt met hars infusie composiet geproduceerd, dan geeft de tool waarden aan van rond de 3.5 kg CO2/kg product (60% glasmat, DCPD-hars).

Analoog aan de business case komt uit de carbon footprint berekening dus ook dat bij het maken van een kg profiel, pultrusie een gunstiger productiemethode is dan vacuüm infusie, maar dat de invloed van de grondstoffen groter is dan de productiemethode. Het beeld wordt dus enigszins vertroebeld omdat voor productie met vacuüm infusie de samenstelling van het composiet anders is dan wanneer pultrusie wordt gebruikt.

6.3.5 Vergelijkingen – planken

Met bovenstaande conclusie in het achterhoofd, werden daarom de dimensies en samenstelling van een aantal varianten composiet oeverbeschoeiingsplanken berekend op basis van gelijke sterkte voor een functionele plank-lengte van 3,5 meter om de carbon footprint te kunnen bepalen (zie de hoofdstukken 3 en 4 Guravage, 2017). Per plank-type is op basis daarvan op de volgende pagina's weergegeven hoeveel van welke grondstof in één plank aanwezig is om als input te dienen voor de Eco Impact Calculator tool. In de figuren zijn lagen met random versterking (glass fibre mals) groen weergegeven en lagen met UD-versterking (glass fibre direct roving) blauw.

Als kernmateriaal is PET-schuim (135 kg/ m^2) geel weergegeven en EoL-composiet gebonden met hars grijs en gearceerd.

Vacuüm infusie met EoL composiet



Grondstoffen EoL infusie plank ('Almere')	Per plank van 3,5 meter (kg)
UP-resin, DCPD	22,20
Glass fibre mats	2,45
Glass fibre direct roving	2,45
EoL material	22,30
Totaal gewicht plank:	49,4

Damwandplank als pultrusieprofiel



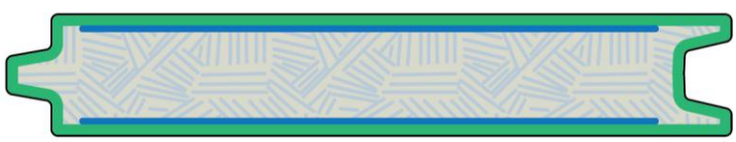
Grondstoffen pultrusie plank (hol)	Per plank van 3,5 meter (kg)
UP-resin, DCPD	14,70
Glass fibre mats	7,50
Glass fibre direct roving	7,50
Totaal gewicht plank:	29,70

Damwandplank met PET-schuimkern



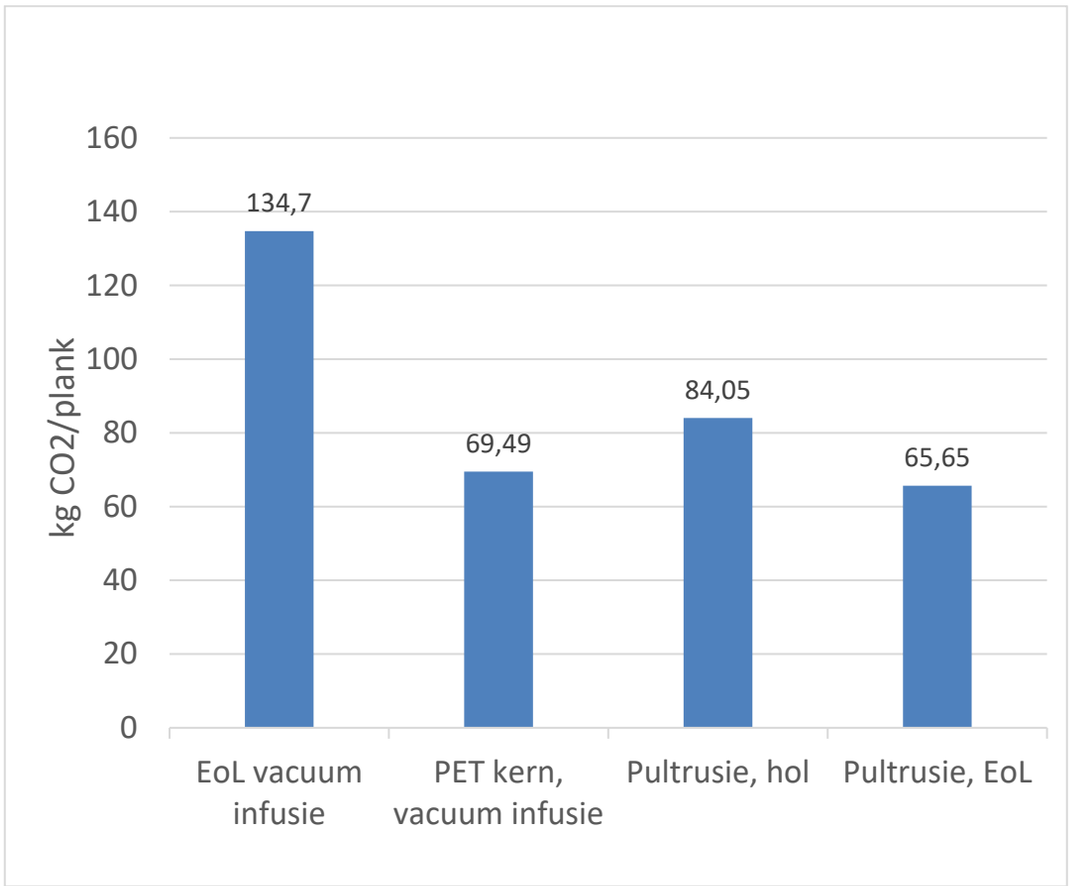
Grondstof PET core plank	Per plank van 3,5 meter (kg)
UP-resin, DCPD	7,30
Glass fibre mats	2,45
Glass fibre direct roving	2,45
PET (135 kg/m3)	4,73
Totaal gewicht plank:	16,93

Pultrusie met EoL composiet



Grondstof EoL pultrusie plank	Per plank van 3,5 meter (kg)
UP-resin, DCPD	9,92
Glass fibre mats	2,45
Glass fibre direct roving	2,45
EoL material	34,58
Totaal gewicht plank:	49,4

Als aan de hand van deze gegevens de carbon footprint wordt berekend in de EuCIA EcoCalculator tool, levert dit het volgende beeld:

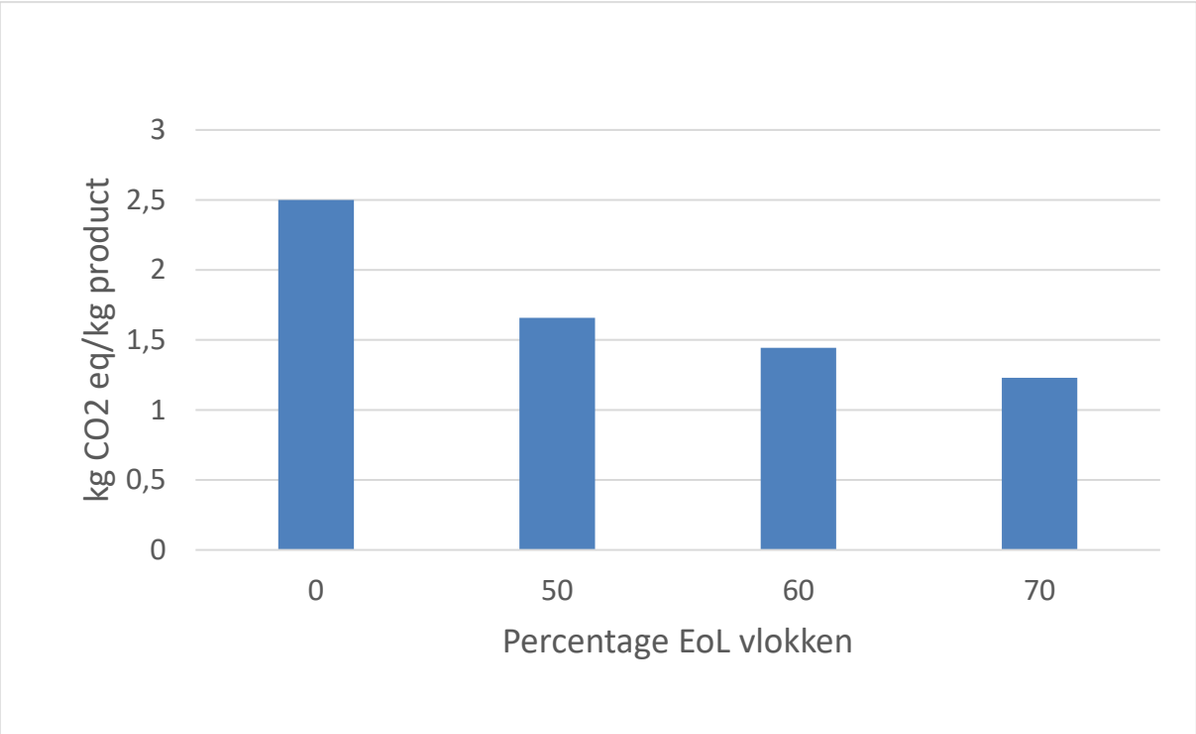


Figuur 6.5: Carbon footprint verschillende composiet planken van 3,5 meter lengte

De EoL plank zoals vervaardigd met vacuüm infusie steekt er met kop en schouders ongunstig bovenuit. De carbon footprint loopt dus parallel met de business case en het verdient om beide redenen daarom geen aanbeveling om deze productie methode in te zetten bij *deze* samenstelling van de plank.

Als echter gekeken wordt naar de plank met de PET kern en de gepultrudeerde varianten, wordt het beeld gunstig. De gepultrudeerde plank met EoL kern komt er nipt het gunstigst uit.

Om te kijken wat het effect dan is van het percentage EoL vlokken op een gepultrudeerd profiel (functionele eenheid 1 vierkante meter), volgt het volgende beeld, Figuur 6.6 (bij aanname van gelijke sterkte).



Figuur 6.6: Carbon footprint van gepultrudeerde profielen als functie van het percentage EoL vlokken (functionele eenheid 1m2)

Er bestaat een duidelijk verband tussen het percentage vlokken en de hoogte van de carbon footprint. Net zoals de economische kant gunstiger wordt bij hogere gehaltes EoL vlokken, wordt ook de carbon footprint gunstiger bij hogere gehaltes vlokken. Dit is natuurlijk niet verwonderlijk omdat virgin materiaal als vulling van het profiel (wat dus bijdraagt aan de carbon footprint) wordt vervangen door 'zand' (wat nauwelijks bijdraagt).

6.3.6 Laatste Opmerkingen en Conclusies

Het is niet ongebruikelijk dat in een volwassen markt de prijs en carbon footprint elkaar spiegelen. Binnen volwassen markten is de marge door jarenlange concurrentie vaak uitgekleed en daardoor een redelijke reflectie van de grondstofkosten, die op hun beurt dan weer een reflectie is van de carbon footprint aangezien de grondstofkosten binnen een dergelijke markt het directe gevolg zijn van de hoeveelheid energie betrokken bij hun productie.

Bovenstaande berekeningen betreffen dus alleen vergelijk tussen composiet delen. In het vervolg project zal verder aandacht worden besteed aan de vergelijking tussen composiet profielen en profielen van andere materialen. Zodra daar naar gekeken wordt, wordt het ook belangrijk om levensduur mee te nemen. Hardhout wordt in natte toepassingen elke 20-25 jaar vervangen, PVC elke 50 jaar, GVK zal 60 tot 100 jaar halen (Halliwell, 2003). Het vinden van de juiste functionele eenheid wordt daarbij ook van belang. Berekenen hoe 1 m^2 zich dan tussen de verschillende materialen verhoudt kan een vertekend beeld opleveren omdat de functionele eenheid een combinatie zal zijn van een bepaalde lengte (dus sterkte) en langere levensduur.

7. Kennisverspreiding, presentatie 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 de werkzame samenleving 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 11 oktober 2017. Het legt daarmee ook de verantwoordelijkheid bij de deelnemers om geen kennis in te brengen in het project die vertrouwelijk moet worden behandeld.

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 7 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 informatieverspreiding en heeft het zelfs ten voorbeeld gesteld bij een ander RAAK-project. 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, zie Appendix 1.

Interviews, presentaties, paneldiscussies en media-uitingen: 17, zie Appendix 1.

Gesprekken over hergebruik op uitnodiging: 14, zie Appendix 1.

Onderwijs

Het LKT verzorgt input voor de volgende onderwijsactiviteiten:

- Minor Production Engineering
- Minor Composieten
- Master Polymer Engineering

Binnen alle drie deze activiteiten worden colleges over composieten verzorgd, waarbij het vraagstuk van circulariteit van deze materialen wordt besproken. Daarbij wordt verteld over de opzet en de resultaten van het RAAK-project.

Desk Studies (30)

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 dit onderwerp kiezen doorgaans zo'n 10 studenten (ca. een derde van het totaal aantal studenten). Zij krijgen 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 andere bedrijven geselecteerd die aanvullende informatie kunnen leveren. Iedere student schrijft een kort verslag en geeft een presentatie over het onderwerp. Zie Appendix 5.

Afstudeerders (5)

Tijdens het project zijn vijf afstudeeropdrachten uitgevoerd. In Appendix 5 staat een korte beschrijving van hun werk, waarvan onderdelen eerder in het rapport uitgebreider zijn beschreven. Het desbetreffende (concept-) afstudeerverslag staat genoemd in de literatuurlijst.

Stagiaires (2)

Twee stagiaires van de studierichting werktuigbouwkunde hebben opdrachten uitgewerkt op deelaspecten van het project. Zie Appendix 5.

Groepsopdrachten in minor programma's (3)

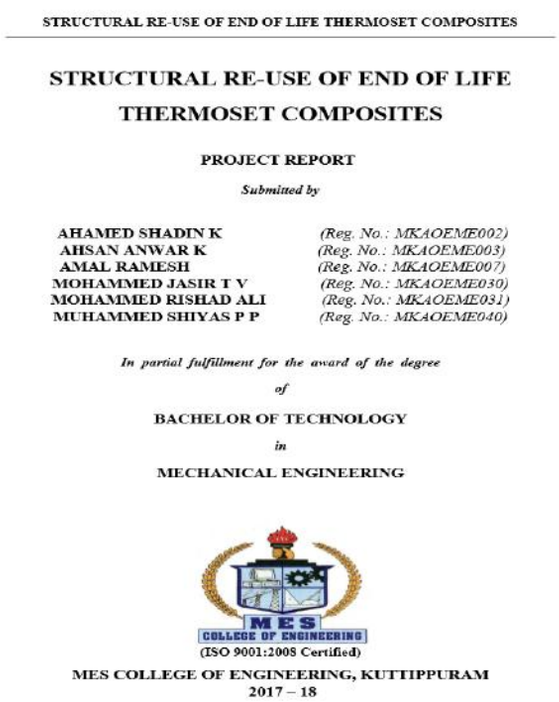
Drie groepsopdrachten zijn uitgevoerd vanuit de minoren Production Engineering en Applied Mechanics op deelaspecten van het project. Zie Appendix 5.

Studentopdrachten buiten Windesheim

Vanuit Hogeschool Zeeland heeft een afstudeerstudent Civiele Techniek een constructie ontworpen van profielen op basis van hergebruikt composiet.

Een afstudeerstudent van de afdeling Industrial Ecology van de TU-Delft heeft het lectoraat benaderd voor informatie over hergebruik van composieten voor de afstudeeropdracht op het gebied van recycling van windturbine-rotoren.

Naar aanleiding van ons artikel in Reinforced Plastics heeft de MES College of Engineering in Kuttipparam (India) ook de methode van hergebruik ter hand genomen voor opdrachten van zes afstudeerderstudenten.



STRUCTURAL RE-USE OF END OF LIFE THERMOSET COMPOSITES

STRUCTURAL RE-USE OF END OF LIFE THERMOSET COMPOSITES

PROJECT REPORT

Submitted by

AHAMED SHADIN K	*(Reg. No.: MKAOEME002)*
AHSAN ANWAR K	*(Reg. No.: MKAOEME003)*
AMAL RAMESH	*(Reg. No.: MKAOEME007)*
MOHAMMED JASIR T V	*(Reg. No.: MKAOEME030)*
MOHAMMED RISHAD ALI	*(Reg. No.: MKAOEME031)*
MUHAMMED SHIYAS P P	*(Reg. No.: MKAOEME040)*

In partial fulfillment for the award of the degree

of

BACHELOR OF TECHNOLOGY

in

MECHANICAL ENGINEERING

MES COLLEGE OF ENGINEERING
(ISO 9001:2008 Certified)

MES COLLEGE OF ENGINEERING, KUTTIPPURAM
2017 – 18

8. Conclusies en aanbevelingen

Terugkijkend op het project kunnen vele conclusies getrokken worden. Deze conclusies worden in de volgende hoofdgroepen onder gebracht: uitkomsten van de werkpakketten, kennisverspreiding en samenvattende conclusies.

Uitkomsten van de werkpakketten

Uit Werkpakket 1 is duidelijk de conclusie te trekken dat er in Nederland nog geen sprake is van een gestructureerde inzameling en verwerking van EoL thermoharde composieten. Er is wel duidelijk geworden aan welke eisen dit zou moeten voldoen: separaat verwerken van verschillende typen EoL thermoharde composieten (continu-versterking vs. random versterking, polyester-gebaseerd vs. epoxy-gebaseerd) en de verwerking tot verschillende grades met minimum eisen ten aanzien van vrij zijn van stof en vocht en de voorwaarde dat hechting mogelijk is (niet vet, ruw/hechtend oppervlak). Verder toont de ontwikkelde onderzoekshredder dat EoL composiet goed vershredderd kan worden tot regelmatige stroken met een vaste lengte en breedte. Echter moet deze techniek worden verbeterd voor een betere sterktebijdrage.

Werkpakket 2 laat zien dat mogelijke verwerkingstechnieken zijn injectietechnieken (vacuüm-folie of RTM), pultrusie-gebaseerde processen en perstechnieken. Met al deze technieken is getoond dat technische goede producten te maken zijn. Echter, alleen met pultrusie-gebaseerde processen is zowel een hoog gehalte aan EoL-vulling te realiseren als een lage hoeveelheid benodigde arbeid per eenheid product. De ontwikkelde push-pultrusiemachine toont dat het continu produceren van een damwandplank met een kern van EoL thermoharde composiet mogelijk is. Andere tests tonen aan dat het gebruik van nieuwe (virgin) hars in een nieuw product gemaakt met EoL thermoharde composiet teruggebracht kan worden tot 30% op gewichtsbasis.

In Werkpakket 3 zijn demonstrators gerealiseerd, geïnstalleerd en gemonitord in het gebruik. De producten blijken alle technisch in het gebruik goed te voldoen. Gedurende de beperkte tijd van het project (2 jaar) kon geen effect van de inwerking van vocht worden geconstateerd.

Een deel van de uitkomsten van Werkpakket 4 waren onverwacht. Zo bleek dat EoL composiet dat is vershredderd met de ontwikkelde shredder tot regelmatige stroken een tegenvallende versterking te geven. Het materiaal is dermate vervormd en verzwakt dat 1) er geen goed pakking meer mogelijk is en 2) er ook geen grote sterkte-bijdrage meer mogelijk is. Uit een aanvullende testserie blijkt dat bij het onbeschadigd verkleinen tot stroken (bijvoorbeeld door zagen) deze wel tot een grote sterkte bijdrage te kunnen leiden. Dit betekent dat de verkleiningsmethode moet worden verbeterd voor het maken van stroken. Wat wel geconstateerd is, is dat de EoL vulling (vlokken of stroken) leidt tot een kern met een grote drukvastheid en een grotere capaciteit voor het overbrengen van schuifspanningen dan een conventionele schuimkern. Verder is uit de resultaten van Werkpakket 4 duidelijk dat producten gemaakt met EoL thermoharde composiet niet moeten worden geconstrueerd voor een kruipbelasting of een vermoeiingsbelasting.

Werkpakket 5 heeft met de damwandplank als model onderzocht hoe de winstgevendheid en de carbon footprint samenhangen met de opbouw van een product gemaakt met EoL thermoharde composiet. Beide aspecten blijken sterk gekoppeld zijn met het percentage EoL materiaal dat in het nieuwe product aanwezig is. Hoe hoger dit percentage hoe hoger de winstgevendheid en hoe lager de carbon footprint. Hierbij blijkt een gewichtspercentage van 70% of hoger een voorwaarde te zijn voor winstgevendheid en een carbon footprint die lager is dan planken die gemaakt zijn met alleen virgin grondstoffen. Dit blijkt te kunnen met een pultrusie-gebaseerd proces. Een positief effect op de winstgevendheid wordt bereikt door meerdere productielijnen te installeren. Het effect van de investering en de kosten van energiegebruik op de winstgevendheid blijkt zeer klein te zijn.

Kennisverspreiding

De kennisverspreiding is zeer succesvol geweest zoals in Hoofdstuk 7 is beschreven. Er kan geconcludeerd worden dat door het betrekken van verschillende minor-programma's en een master-programma er veel studenten kunnen worden betrokken bij deelaspecten van het onderzoek. Tevens kunnen resultaten goed worden verwerkt in het curriculum van deze programma's. Naast de verspreiding van de kennis bij de studenten wordt dit ook bereikt bij de betrokken docenten die vaak ook in deeltijd bij het lectoraat bij het onderzoek van het project betrokken waren. Verder hebben de voorafgaande KIEM-VANG-onderzoeken geleid tot veel gelegenheden tot externe kennisverspreiding waar dankbaar gebruik van is gemaakt. Dit kwam bijvoorbeeld tot uiting door diverse uitnodigingen van de onderzoekers voor het geven van presentaties, interviews en deelname aan paneldiscussies.

Samenvattende conclusies

Er kan geconcludeerd worden dat het verzamelen en verwerken van EoL thermoharde composieten nog niet voldoende is ontwikkeld voor een industrieel gebruik van de methode van hergebruik. De logistiek, de gescheiden verwerking per type, het realiseren van verschillende grades en het behouden van intrinsieke sterkte bij het verkleinen zijn nog niet voldoende ontwikkeld.

Daarnaast zijn er goed werkende productietechnieken ontwikkeld die leiden tot technisch goede producten die succesvol in verschillende demonstrators zijn verwerkt. Door een pultrusie-gebaseerd proces te gebruiken is het mogelijk om het virgin harsgebruik terug te dringen tot 30 gewichtsprocenten, hetgeen nodig is voor een goede business-case wat betreft winstgevendheid en carbon-footprint.

Na dit onderzoeksproject zijn er aanbevelingen te maken. Deze zijn deels aanbevelingen die voortkomen uit de resultaten die behaald zijn in het project of die juist nog niet gehaald zijn. Maar er komen ook aanbevelingen voort uit nieuwe inzichten die zijn gevormd tijdens het project.

Aanbevelingen voortkomend uit de projectresultaten

De logistiek van en inzamelen van EoL thermoharde composietproducten moet op een industrieel niveau gebracht worden. Vervolgens moeten verwerkingstechnieken worden ontwikkeld die per type product leiden tot verschillende grades van vlokken en stroken, waarbij met name voor het maken van de stroken een techniek moet worden ontwikkeld die de intrinsieke sterkte van het materiaal intact laat.

De langeduur eigenschappen zijn grotendeels theoretisch beoordeeld aan de hand van methoden uit de CUR96. Het is aan te bevelen om lange-duurgedrag zoals inwerking van water, permanente belasting (kruip) en vermoeiing nader te onderzoeken.

De meeste producten in het onderzoek zijn gemaakt op basis van polyesterhars als virgin bindmiddel. Het wordt aanbevolen om het gebruik van andere harsen (epoxy, polyurethaan, acrylaat) nader te onderzoeken op technische prestatie en op prestatie in de business case.

De analyses van de business case voor winstgevendheid en duurzaamheid moeten worden uitgebreid naar andere producten dan alleen de damwandplank en ook worden uitgebreid naar een complete LCA-beschouwing.

Aanbevelingen die voortkomen uit nieuwe inzichten

De tijd wordt steeds gunstiger voor het industrieel hergebruiken van EoL thermoharde composieten zoals in dit project is onderzocht. Dit inzicht komt voort uit verschillende constateringen tijdens het project: men is bereid meer te betalen voor een langere levensduur (tot voor kort was dit niet het geval), er is zeer veel interesse voor het thema en bijeenkomsten worden goed bezocht, het probleem van EoL thermoharde composieten is een internationaal probleem en zal de komende jaren ook steeds groter worden en tenslotte stijgen de kosten voor het verwijderen van EoL thermoharde composieten de laatste jaren sterk. Uit dit inzicht bevelen wij aan om grootschalig te investeren in een industriële aanpak van verzamelen, verwerken en commercialiseren van EoL thermoharde composieten door middel van hergebruik volgens de methode van Windesheim. Een stimulans vanuit overheden (Rijkswaterstaat, waterschappen, provincies, gemeenten) om MKB-bedrijven de stap te laten maken voor benodigde investeringen hiervoor zou kunnen zijn om eenmalig voor een substantieel project een fors hogere inkoopprijs te accepteren voor het gebruik van producten uit EoL thermoharde composieten in plaats van traditionele materialen.

Appendix 1 Bijeenkomsten, interviews, presentaties, paneldiscussies, media

De genoemde bijeenkomsten, interviews, presentaties, paneldiscussies en media-uitingen vonden plaats gedurende de looptijd van het project (1 oktober 2017 tot 1 oktober 2019).

Bijeenkomsten, georganiseerd vanuit het project

11 oktober 2017
Startbijeenkomst van het RAAK-MKB-project
Windesheim, Zwolle

19 oktober 2017
Workshop hergebruik composieten
Composites Structures, Meerkerk

31 oktober 2017
rHPL-panelen interieurbouw
Presentatie van nieuw interieur in T-gebouw
Windesheim, Zwolle

28 november 2017
Brainstorm-meeting Werkpakket 2
Polem, Lemmer

9 januari 2018
Stuurgroep bijeenkomst RAAK-MKB-project
Windesheim Flevoland, Almere

19 februari 2018
Werkpakketleidersoverleg
Windesheim, Zwolle

19 maart 2018
Voortgangsbespreking Werkpakket 2
Aliancys, Zwolle

11 juni 2018
Workshop Werkpakketten 1 en 2
Fiberneering, Zwolle

30 augustus 2018
Werkpakketleidersoverleg
Windesheim, Zwolle

8 oktober 2018
Telefonische stuurgroep bijeenkomst RAAK-MKB-project

17 oktober 2018
Voortgangsbijeenkomst van het RAAK-MKB-project
Brainz, Zwolle



17 december 2018
Voortgangsbespreking Werkpakket 2
Windesheim, Zwolle

22 januari 2019
Nationale Agenda Composieten – Hergebruik
Themabijeenkomst, georganiseerd op verzoek van brancheverenging CompositesNL
Windesheim, Zwolle

17 juni 2019
Werkpakketleidersoverleg
Windesheim, Zwolle

Interviews en uitnodigingen voor een gesprek

11 oktober 2017
Uitnodiging van de projectleider voor een gesprek met Bouke Veldman en Ben Drogt van Compoworld over verkenningen voor een mogelijke Compoworld-project op gebied van hergebruik van composieten.
Windesheim Flevoland, Almere

30 januari 2018
Uitnodiging van de projectleider voor een gesprek met Jeroen van den Heuvel (HISWA) en Manon van Meer (Waterrecreatie Nederland) over de ontwikkelingen van Windesheim voor hergebruik polyester bootrompen
HISWA, Amsterdam

6 februari 2018
Uitnodiging van de projectleider voor een gesprek met Bert-Jan van der Woude en Raymond Schrevel over de ontwikkelingen van Windesheim voor hergebruik composieten, met name met het oog op windmolenrotoren.
SUEZ, Almere

28 februari 2018
Verzoek van Compoworld voor een gesprek over hergebruik composiet
Gesprek met Bouke Veldman en Ben Drogt (Compoworld), Cora Burger en Hans Kelderman (Demacq), Geert Siereveld (Composite Structures) en projectleider over de mogelijkheden voor het opzetten van een Compoworld-project op gebied van hergebruik van composieten.
Windesheim, Zwolle

7 maart 2018
Uitnodiging van de projectleider voor een gesprek met Jeroen Hendrikx, Matthijs Erbenveld, Ed Berendsen en Evert Schut van Rijkswaterstaat (RWS) over toepassingen van hergebruikt composiet in waterbouwkundige werken.
RWS, Utrecht.

12 maart 2018
Uitnodiging van de projectleider voor een gesprek met Robbert-Jan Kooijman en Kornelis Jorna van OostNV over mogelijke samenwerking op het gebied van hergebruik van composieten.
Windesheim, Zwolle

4 juli 2018
Verzoek van Compoworld voor een gesprek van de projectleider met Ben Drogt (Compoworld), Peet Bijl en Luuk van Breda (Bijl Profielen, nu Krafton), Geert Siereveld (Composite Structures) over mogelijk Compoworld-project om een push-pultrusielijn op te zetten voor het verwerken van hergebruikt composiet.
Bijl Profielen (Krafton), Heijningen (Noord-Brabant)

20 augustus 2018
Verzoek van Duitse energieproducent tot gesprek over hergebruik composiet
Eerste bezoek van delegatie van RWE aan lectoraat
Windesheim, Zwolle

2 oktober 2018
Tweede bezoek van delegatie van Windesheim aan RWE
Hoofdkantoor RWE, Essen

Periode na 2 oktober 2018
Diverse telefoongesprekken en mails met vertegenwoordiger van RWE, Klaas Schuring

11 maart 2019
Verzoek van Cor Kamminga (KNN) en Roel Folkersma (Gemeente Emmen) voor gesprek met projectleider over mogelijkheden voor een vervolgproject op het gebied van hergebruik van composiet in de gemeente Emmen.
Windesheim, Zwolle.

12 maart 2019
Telefonisch interview van Angelique Erkenbosch (Innovation Quarter) met de projectleider over mogelijkheden voor ontwikkeling van het verwerken van EoL composiet (met name windmolenrotoren) in het Rotterdamse havengebied.

21 maart 2019
Verzoek om gesprek van Maarten Barckhof en Ron van Wijk van Stichting Circulair Bouwen en Ron Vuur van Verantwoorde Toekomst met de projectleider
Windesheim Flevoland, Almere

26 maart 2019
Verzoek van Nina Kallio van Virol (Scheemda) voor gesprek met de projectleider over mogelijkheden voor het verwerken van EoL windmolenrotoren.
Windesheim, Zwolle.

9 juli 2019
Uitnodiging van de projectleider door Smart Port en Innovation Quarter om deel te nemen aan een bijeenkomst om te onderzoeken of een verwerking industrie is op te zetten voor EoL windmolenrotoren in het Rotterdamse havengebied.
Hotel New York, Rotterdam

10 juli 2019
Telefonisch interview van Dennis Derksen (NRK) met de projectleider over hergebruik composiet en de huidige status van het project.

15 juli 2019
Interview bij Windesheim van projectleider door Sander Klos van Media Maritiem
Ten behoeve van een artikel over het hergebruik van composieten bij polyester jachten

Presentaties

25 oktober 2017
Remanufacturing composites.
Presentatie van Sam Guravage
Als genomineerde van de BRBS Recycling Award (kreeg 3e prijs)
Evenementenhal, Gorinchem

5 april 2018
Eindelijk een oplossing voor End-of-Life composieten!
Presentatie van Dr. Ir. Albert ten Busschen
Nationaal Kunststof Congres
Evenementenhal, Steenwijk

21 november 2018
Continu-productieproces voor damwanden uit hergebruikt composiet.
Presentatie van Lennard Garcia Villamor
Als genomineerde van de BRBS Recycling Award (kreeg 2e prijs)
Evenementenhal, Gorinchem

22 januari 2019
Eindelijk een oplossing voor End-of-Life composieten!
Presentatie van Dr. Ir. Albert ten Busschen
Nationale Agenda Composieten - Hergebruik
Windesheim, Zwolle

7 maart 2019
Eindelijk een oplossing voor End-of-Life composieten!
Presentatie van Dr. Ir. Albert ten Busschen
Lezing Cinema aan het water
Dromedaris, Enkhuizen

12 juni 2019
Oplossingen voor End-of-Life thermoharde composieten.
Masterclass tijdens de WindDays door Dr. Ir. Albert ten Busschen
World Trade Centre, Rotterdam

27 juni 2019
Samenwerking en alliantievorming voor end-of-life composieten.
Presentatie door Ir. Eric Roetman
Hogeschool Congres Maatschappelijke Impact van Praktijkgericht Onderzoek
RDM-terrein, Rotterdam



Paneldiscussies

14 november 2017
End-of-Life Boats
Paneldiscussie met deelname van de projectleider tijdens de Metstrade
RAI, Amsterdam



14 maart 2019
Nationale Composiet Agenda
Aangeboden aan de secretaris-generaal van het ministerie van EZK (Maarten Kamps), topteam HTSM (Marc Hendriks) en de Nederlandse ambassadeur in Parijs (Pieter de Gooijer). Deelname aan de discussie over hergebruik van EoL composieten door lector Margie Topp.
Le Palais des Congrès de Paris



Artikelen in kranten en tijdschriften

Boten en rotors hergebruiken als oeverbeschoeiingsplank
Kunststof en Rubber 4, 2017

Hergebruik composieten niet langer een brug te ver
Artikel in Windesheimuitgave Krachten Bundelen, 2017

12 mei 2018
Wat kun je met een molenwiek?
Leeuwarder Courant – In het nieuws 3 (zaterdag-bijlage)



LC in het nieuws 3

Wat kun je met een molenwiek?

De berg afgedankte molenwieken, gemaakt van onvergankelijke glasvezels met versmolten harsen, groeit naar enkele tienduizenden tonnen per jaar. Maar wat moet je ermee? De mogelijkheden en onmogelijkheden op een rijtje.

Hoe circulair draaien de wieken?

Vragen VVD en FNP in provinciale staten

5 mei 2018
Als de wieken niet meer rondgaan.
De Volkskrant – Wetenschap – Duurzaamheid (zaterdag-bijlage)



DE VOLKSKRANT 46

WETEN SCHAP

Duurzaamheid

Als de wieken niet meer rondgaan

Windenergie is duurzaam, maar het afval van afgeschreven windmolens niet. Ontwerpers en onderzoekers zoeken naar creatieve oplossingen om wieken te hergebruiken.

Door Larissa van Dijk Foto's Renate Beense

Recycling polyester rompen probleem.
Jachtbouw Nederland, No. 4
Augustus 2018

Recycling windmolenwieken nog in kinderschoenen
Vakblad afval, No. 7
November 2018

Quote van de projectleider tijdens het ICC in Stuttgart in september 2017 die wordt aangehaald in het blad Plastics News Europe, maart 2018.

Fibre Reinforced Composites now completely recycled
(interview met Margie Topp)
Holland Chemistry Times 01, December 2018

Ook een oud rotorblad kun je nog recyclen
Artikel in nieuwsbrief Voor de wind van Certion
Winter 2018/2019


VOOR DE WIND

CERTION
turbine support team

NIEUWSBRIEF | WINTER 2018/2019

IN DIT NUMMER:
- OOK EEN OUD ROTORBLAD KUN JE RECYCLEN
- PASSEN EN METEN BIJ TRANSPORT
- SERVICETECHNICUS MARK JANSEN
- TURBINEBLADEN KRIJGEN TWEEDE LEVEN

OOK EEN OUD ROTORBLAD KUN JE RECYCLEN

Windenergie is duurzaam, maar ook de recycling van grondstoffen voor de turbines draagt daar aan bij. Met Hogeschool Windesheim en enkele andere projectpartners werkt Certion al enkele jaren nauw samen om de composiet materialen van de rotor te hergebruiken. Met succes.

Vestas

PASSEN EN METEN

Duurzame aanpak Dinzerbrug: Dekplanken van vezelversterkt kunststof
Civiele Techniek
Nummer 4, 2019

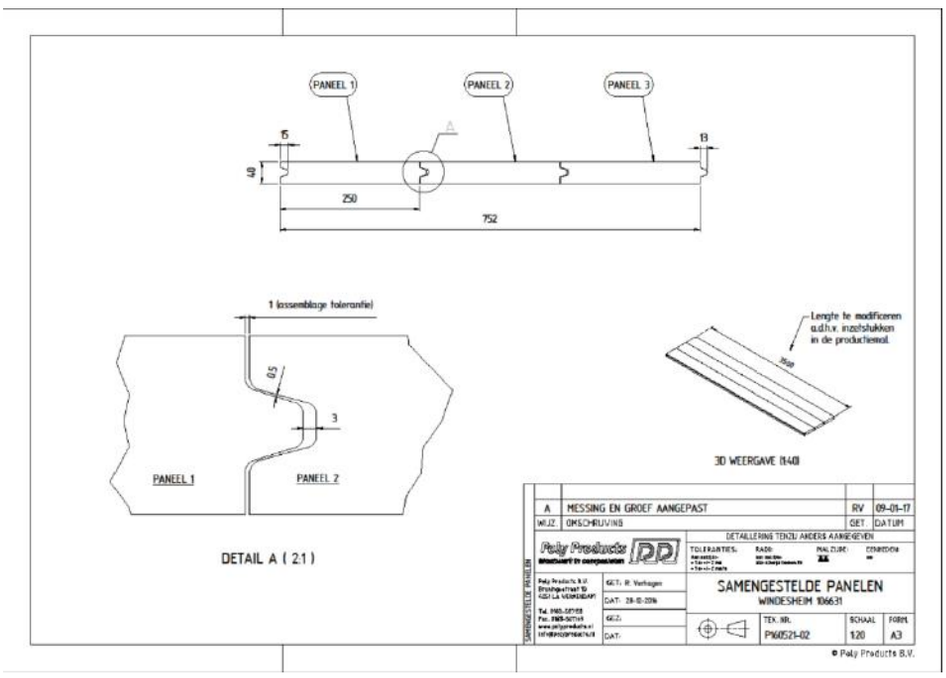
Samenwerking in de keten essentieel voor succesvol hergebruik
(Interview met Lectoraat Kunststoftechnologie over hergebruik composieten.)
Kunststof Magazine September / Oktober 2019

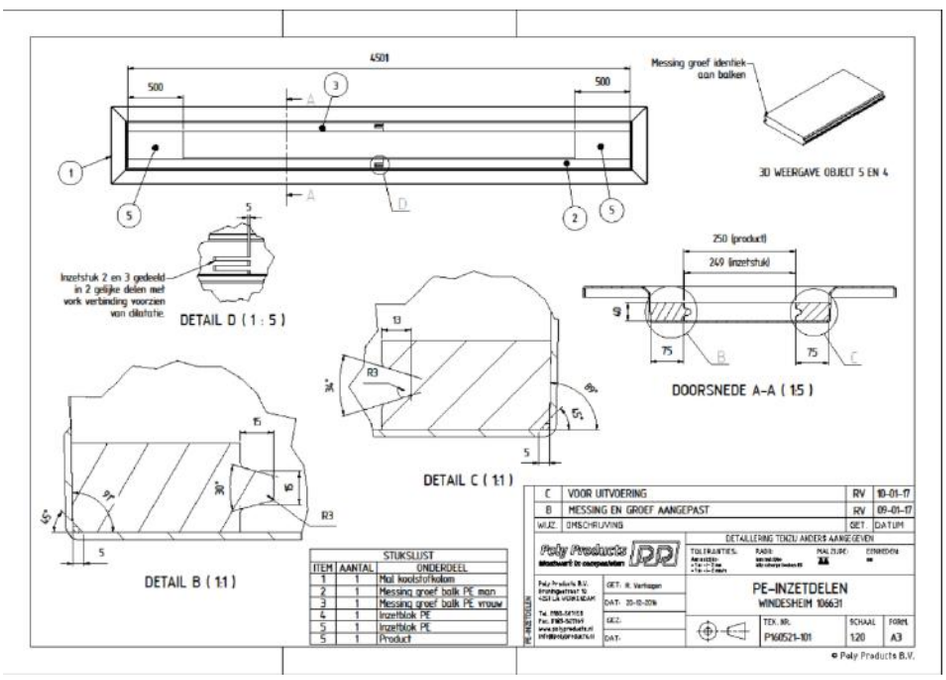
Interview met A. ten Busschen over hergebruik van polyester jachtrompen.
SWZ-Magazine, special over jachtbouw, September 2019

Appendix 2 Productiegegevens en foto's

Productie damwandplanken

Plankgeometrie, tekening stalen mal en PE-inzetstukken voor randdetails





Veiligheidsinstructie en productieprogramma

Windesheim

Locatie Lelystad – Instructie veilig werken

Ruimte:	Loods, Verlaatweg 3, Lelystad	
Aanspreekpunten:	Albert ten Busschen	(06-51916870)
	Pieter Schreuder	(06-30107917)
	Sam Guravage	(06-43005594)

Roken en open vuur zijn verboden

Eten en drinken alleen in de kantine

Altijd dragen:	Veiligheidsbril, werkschoenen, overall
Bij werken met harsen:	Latex handschoenen dragen

Gevaarlijke stoffen

Peroxides (Norox, Butanox M50)	bijtend voor ogen en huid voorraden in koelkast
Aceton	zeer brandbaar
Polyesterhars	uithardende resten afblussen

Naam kaarthouder	Naam instructeur
Datum en handtekening	Datum en handtekening

Windesheim

Dagprogramma productie

08.30	**aanwezig**	Koffie/thee, werkkleding aantrekken
08.45	1	Folie/peelply producten vorige dag eraf
09.00	2	Lossen producten vorige dag uit mallen
09.15	3	Schoonmaken inzetstukken en mallen
09.45	4	Gelcoaten: nummers, nerven, messing/groef
10.30	**pauze**	
10.45	5	Matstroken plakken op messing/groef
11.00	6	Inleggen fillets-Polymat-UD-vlokken-UD
11.30	7	Leidingen leggen en folie plakken
12.00	8	Vacuum zetten, controle luchtdichtheid
12.30	**pauze**	
13.00	9	Harsaanmaak en injectie
13.30	10	Afwerken producten vorige dag (afbramen)
14.00	11	Glassnijden voor volgende dag
14.30	**pauze**	
14.45	12	Voorraden aanvullen, materiaal klaarzetten
15.00	13	Opruimen en schoonmaken (hal + kantine)
15.45	afronden	Apparaten uit, werkkleding uit
16.00	**einde werkdag**	

Veilig werken: aftappen uit IBC, wegen en doseren met harder-pomp



Laagopbouw voor een damwandplank in een stalen injectie-mal

Productie damwandplanken: laagopbouw

In volgorde van inleggen in de mal

Nummer	Aantal	Specificatie	Oppervlaktegewicht (g/m^2)	Formaat (L x B in m)
1	1	Gelcoat 'nerven'	nihil	n.v.t.
2	1	Injectie-glasmat	900	4,0 x 0,63
3	1	UD-glasversterking	840	4,0 x 0,20
4	1	Glasfillet in detail 1	n.v.t.	3,5 m lengte
6	1	Stroken EoL 1	ca. 2,7 kg	ca. 0,5 m lengte
7	1	Vlokken EoL 1	ca. 8,5 kg	n.v.t.
8	1	Glasfillet in detail 2	n.v.t.	3,5 m lengte
9	1	Vlokken EoL 2	ca. 8,5 kg	n.v.t.
10	1	Stroken EoL 2	ca. 2,7 kg	ca. 0,5 m lengte
11	1	Glasfillet in detail 3	n.v.t.	3,5 m lengte
12	1	UD-glasversterking	840	3,5 x 0,20
13	1	Injectie-glasmat	900	gevouwen uit 2
14	1	Peelply	90	4,0 x 0,40
15	1	Folie	70	4,5 x 1,0

Injectiehars en uithardingssysteem

Injectiehars: polyesterhars Distriton 3501 LE (voorversneld)
Leverancier: Polynt

inkleuren met 2% pigmentpasta RAL 8003 (leembruin)
Leverancier: De IJssel Coatings

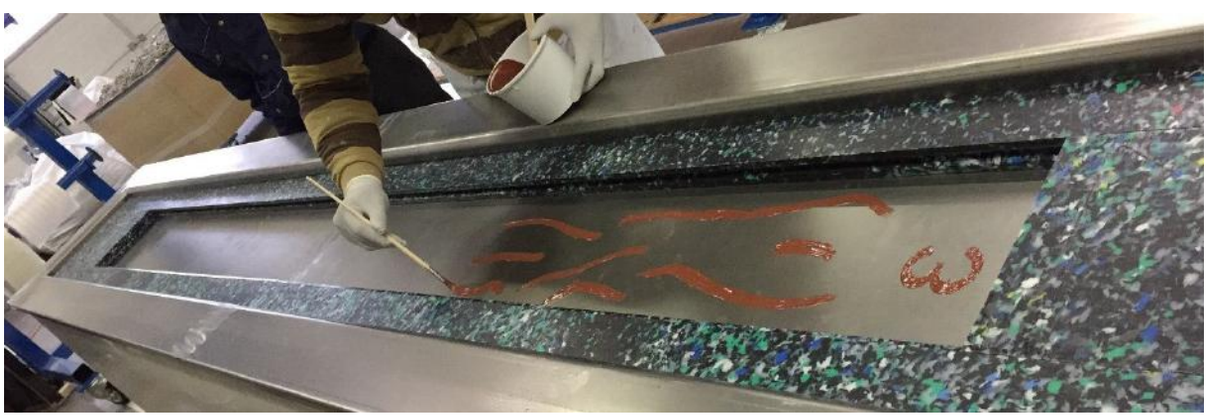
Uithardingssysteem: 1,5% Norox MCP (lage piek peroxide)
Leverancier: MC Technics

Verwerkingstemperatuur: minimaal 15 °C

Fotoreportage productie



Voorbereiding mal: in de was zetten en PE-inzetstukken plaatsen.



Aanbrengen van ‘nerven’ en volgnummer plank met bruine gelcoat (RAL 8007).



Plaatsen van injectiemat in mal.



Plaatsen van eerste UD-laag en eerste fillet voor randdetail.



Drogen van de vlokken (bakken met vlokken worden in een ‘droogkist’ geplaatst).



Plaatsen van eerste stroken en storten van eerste laag vlokken.



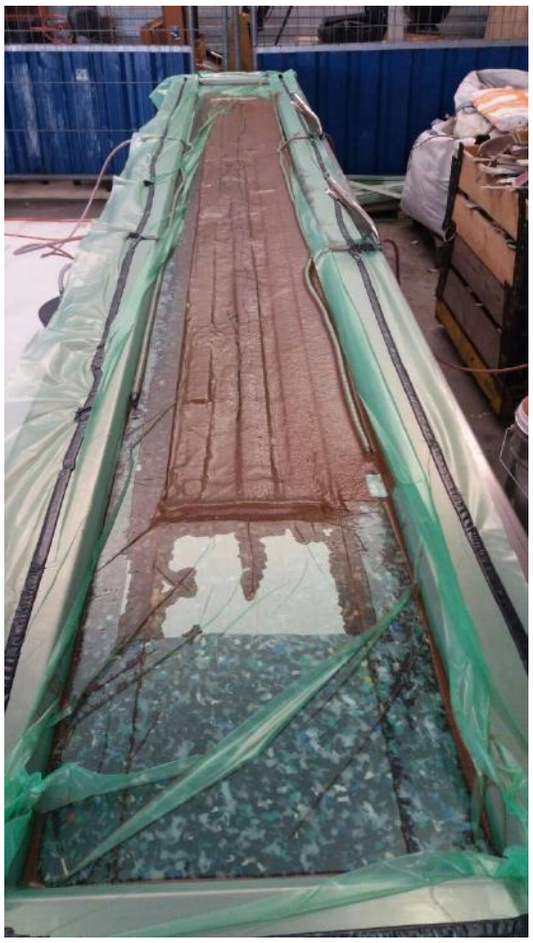
Plaatsen van de fillets, tweede UD-laag en stroken.



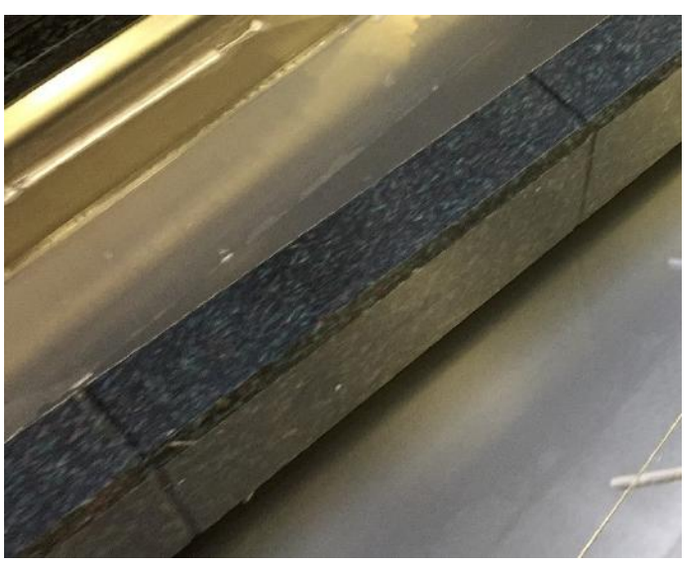
Rollenkar voor glas en folie.



Dichtvouwen polymat, aanbrengen leidingen.



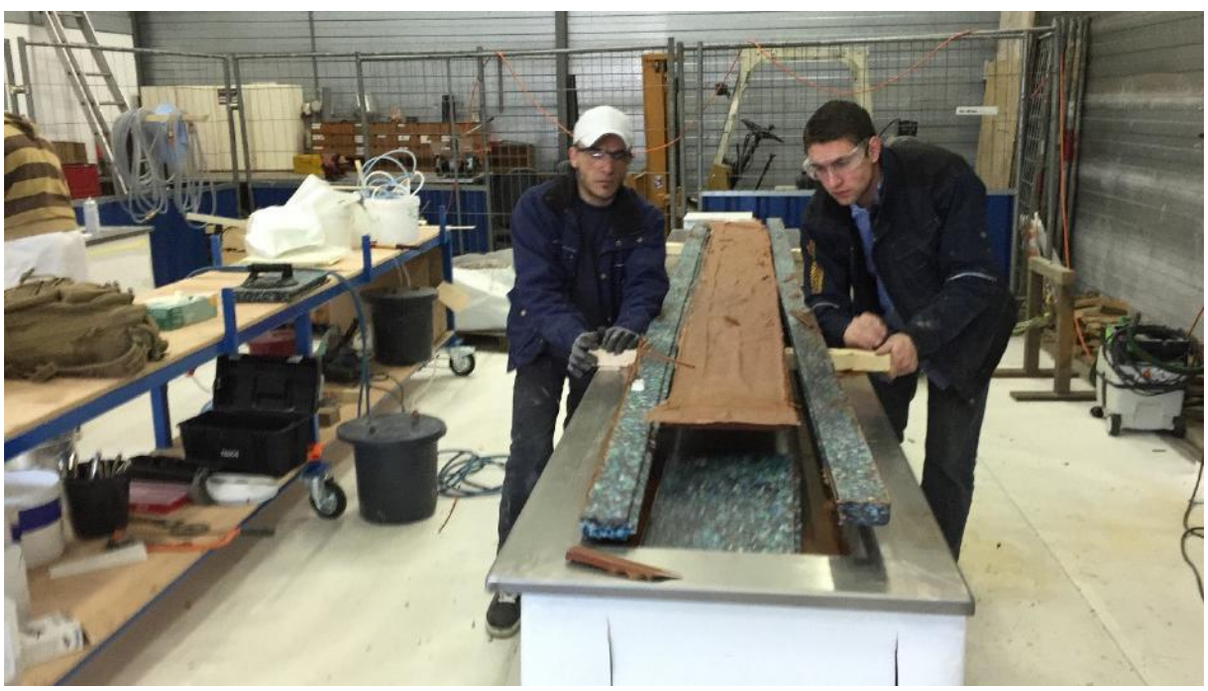
Aanbrengen peel-ply, folie en injectie.



Detail van groeven in PE-inzetstukken t.b.v. bevordering harsstroming onderlangs.



Lossen product m.b.v. van zuignap op eind-inzetstuk.



Verder lossen en loshalen van PE-inzetstukken door onderlangs balk doorhalen.



Nabewerken product.



Schoonmaken PE-inzetstukken en mal.

Productie demonstrator wrijfgording t.b.v. sterktetest

Productie wrijfgording voor test: laagopbouw

In volgorde van inleggen in de mal

Nummer	Aantal	Specificatie	Oppervlaktegewicht (g/m^2)	Formaat (L x B in m)
1	1	Injectie-glasmat	1000	4,2 x 0,9
2	3	UD-glasversterking	600	8,4 x 0,2
3	2	Quadraxiaal-glasv.	1200	4,2 x 0,6
4	3	UD-glasversterking	600	8,4 x 0,2
5	2	Quadraxiaal-glasv.	1200	4,2 x 0,6
6	3	UD-glasversterking	600	8,4 x 0,2
7	2	Quadraxiaal-glasv.	1200	4,2 x 0,6
8	3	UD-glasversterking	600	8,4 x 0,2
9	2	Quadraxiaal-glasv.	1200	4,2 x 0,6
10	3	UD-glasversterking	600	8,4 x 0,2
11	1	Vlokken	NVT	NVT
12	3	UD-glasversterking	600	gevouwen uit 10
13	2	Quadraxiaal-glasv.	1200	gevouwen uit 9
14	3	UD-glasversterking	600	gevouwen uit 8
15	2	Quadraxiaal-glasv.	1200	gevouwen uit 7
16	3	UD-glasversterking	600	gevouwen uit 6
17	2	Continu-glasmat	1200	gevouwen uit 5
18	3	UD-glasversterking	600	gevouwen uit 4
19	2	Quadraxiaal-glasv.	1200	gevouwen uit 3
20	3	UD-glasversterking	600	gevouwen uit 2
21	1	Injectie-glasmat	1000	gevouwen uit 1
22	1	Peelply	90	4,0 x 0,2

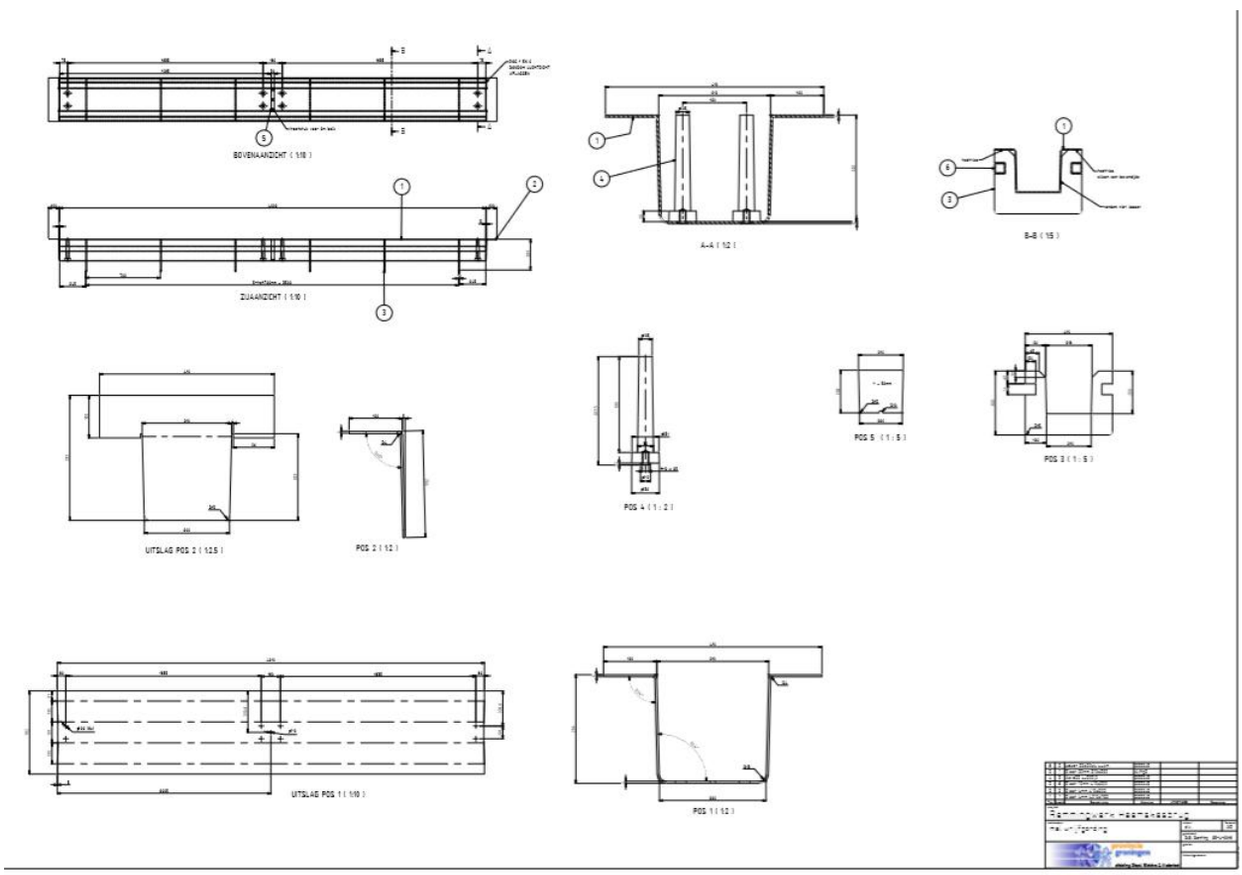
Injectiemat:	2,7 kg
UD-lagen:	15,0 kg
Quadraxiaalversterking:	24,0 kg
Vlokken:	90,5 kg
Hoeveelheid hars aangemaakt:	126,9 kg

Harstype: polyesterhars voor injectie, Synolite 1967-G-9 (leverancier Aliancys)
Toegevoegd 2% pigmentpasta RAL 8003 (leverancier De IJssel Coatings)

Uitharding: 2% Trigonox 249 (leverancier Nouryon, voorheen Akzo Nobel)

Temperatuur: 20 °C

Tekening en foto's stalen ondermal







Bovenmal: binnenzijde met afdichtingen en in gebruik op stalen ondermal





Voorbereiding grondstoffen: emmers met vlokken en op maat gesneden versterkingslagen



Start: inleggen injectiemat, UD-lagen en Quadriaalversterking



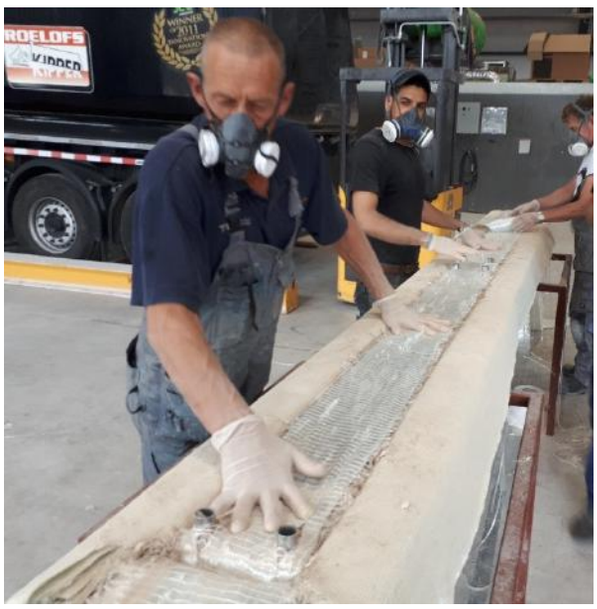


Vullen met vlokken





Dichtvouwen





Injectie





Doorsnede van geproduceerde balk (na test bij TU-Delft)



Productie balken voor dragline-schot

TRA: Taak-Risico-Analyse (vooraf opgesteld en doorgenomen met betrokkenen)

TAAK - RISICO - ANALYSE (TRA)		**Productie balken Welex**
		Nieuwe Rijksweg 66 P , Lexmond
		Werkruimte van ca. 8 x 10 m (gedeelte in revisiehal)
Lectoraat Kunststoftechnologie	*RAAK-project 106851*	*Door Dr. Ir. Albert ten Busschen*
Christelijke hogeschool Windesheim, Zwolle	*'Industrieel hergebruik composieten'*	*Opgesteld 5 april 2019*

Activiteit	**Gevaar**	**Maatregel**
Inrichting ruimte (april 2019)		
Aanleveren droge grondstoffen (vlokken, glasvezel)	nvt	nvt
Aanleveren gereedschappen en mal	nvt	nvt
Aanleveren IBC met 500 kg polyesterhars	lekkage / morsen	vloer afplakken met stucloper bij aftap, weegschal en mengplaats (ca. 5 m2)
	brandgevaar	geen brandgevaarlijke werkzaamheden binnen straal van 10 meter van IBC
	verspreiding / bodemverontreiniging	IBC plaatsen op lekbak met 110% opvangcapaciteit van volle IBC
Aanleveren peroxide ca. 10 kg in cans	instabiliteit	koel houden door opslag in koelkast
	instabiliteit	voorkomen vervuiling: in originele verpakking houden
Aanleveren aceton ca. 10 kg in cans	brandgevaar	geen brandgevaarlijke werkzaamheden binnen straal van 10 meter
	brandgevaar	verpakking gesloten houden, spoelen gereedschap in afsluitbaar blik
Standaard aanwezig: brandblusser, map met veiligheidbladen (MSDS) van gebruikte stoffen, bestickering cans/vaten/IBC		
PBM's: veiligheidsschoenen altijd aan / afhankelijk van handeling werkhandschoenen		
Productie balken (mei 2019)		
Glasvezelversterking voorknippen / snijden	huidirritatie handen	latex handschoenen
Mal in de was zetten	huidirritatie handen	latex handschoenen
Eerste glaslagen in mal en spiraalslang	huidirritatie handen	latex handschoenen
Volstorten met vlokken en aantrillen	irritatie handen, ogen en luchtwegen	latex handschoenen, veiligheidsbril en mond/neuskap
Dichtvouwen van glaslagen	huidirritatie handen	latex handschoenen
Mal afdekken met maldeksel	nvt	nvt
Inpakken mal in folie en aansluiten leidingen	nvt	nvt
Aftappen hars en inmengen harder (peroxide)	morsen	vloer is afgeplakt, absorptiedoeken en lege emmers bij de hand
	spetteren op huid of in ogen	latex handschoenen, veiligheidsbril en beschermende kleding
	brandgevaar	geen brandgevaarlijke werkzaamheden binnen straal van 10 meter
	styreendamp	open ruimte waardoor grenswaarde (25 ppm) niet bereikt wordt
Injectie product en laten uitharden	brandgevaar	pas bij afkoeling product ruimte verlaten
	brandgevaar	aangemaakte harsresten in emmers voorzien van laagje water erop
Afhalen folie en maldeksels	snijgevaar aan scherpe harssplinters	werkhandschoenen, veiligheidsbril
Keren mal en lossen product	geplet worden als product van tafel valt	stevige, brede werktafel / gebruik bovenloopkraan + product in strop houden
Schuren bramen op product	snijgevaar aan scherpe harssplinters	werkhandschoenen, veiligheidsbril
Verplaatsen product naar opslag	geplet worden als product valt	gebruik bovenloopkraan of vorkheftruc + begeleiding tegen kantelen
Schoonmaken mal en maldeksels	snijgevaar aan scherpe harssplinters	werkhandschoenen, veiligheidsbril
Standaard aanwezig: brandblusser, map met veiligheidbladen (MSDS) van gebruikte stoffen, bestickering cans/vaten/IBC		
PBM's: altijd veiligheidsschoenen en overall aan, altijd veiligheidsbril op / afhankelijk van handeling: latex handschoenen en mond/neuskap		
Opruimen inrichting (eerste week juni 2019)		
Afvoeren droge grondstoffen	nvt	nvt
Afvoeren gereedschappen en mal	nvt	nvt
Afvoeren IBC met nog 50 tot 150 kg hars	lekkage / morsen	vloer is afgeplakt, absorptiedoeken en lege emmers bij de hand
	brandgevaar	geen brandgevaarlijke werkzaamheden binnen een straal van 10 meter
	verspreiding / bodemverontreiniging	vloer is afgeplakt, absorptiedoeken en lege emmers bij de hand
Afvoeren peroxide (paar kg, nog in cans)	instabiliteit	koel houden door opslag in koelkast
	instabiliteit	voorkomen vervuiling: in originele verpakking houden
Afvoeren aceton (paar kg, nog in cans)	brandgevaar	geen brandgevaarlijke werkzaamheden binnen straal van 10 meter
	brandgevaar	verpakking gesloten houden, spoelresten in gesloten blik houden
Afvoeren inert afval (folie, uitgeharde harsresten)	nvt	nvt
Afvoeren chemisch afval (o.a. vervuilde doeken)	vervuiling	afvoeren in afgesloten emmers / blikken
Standaard aanwezig: brandblusser, map met veiligheidbladen (MSDS) van gebruikte stoffen, bestickering cans/vaten/IBC		
PBM's: veiligheidsschoenen altijd aan / afhankelijk van handeling werkhandschoenen		

Versterkingspakket

Productie balken voor dragline-schot: laagopbouw

In volgorde van inleggen in de mal

Nummer	Aantal	Specificatie	Oppervlaktegewicht (g/m^2)	Formaat (L x B in m)
1	1	Peelply	90	6,0 x 0,2
2	1	Injectie-glasmat	900	5,6 x 0,9
3	1	Quadraxiaal-glasv.	1200	5,6 x 0,9
4	**5**	UD-glasversterking	840	10,6 x 0,2
5	1	Continu-glasmat	450	10,6 x 0,25
6	**5**	UD-glasversterking	840	10,6 x 0,2
7	1	Quadraxiaal-glasv.	1200	5,6 x 0,9
8	1	Vlokken en zand	NVT	NVT
9	1	Quadraxiaal-glasv.	1200	gevouwen uit 7
10	**5**	UD-glasversterking	840	gevouwen uit 6
11	1	Continu-glasmat	450	gevouwen uit 5
12	**5**	UD-glasversterking	840	gevouwen uit 4
13	1	Quadraxiaal-glasv.	1200	gevouwen uit 3
14	1	Injectie-glasmat	900	gevouwen uit 2
15	1	Peelply	90	6,0 x 0,2

Harstype: polyesterhars voor injectie, Synolite 1967-G-9 (leverancier Aliancys)
Toegevoegd 2% pigmentpasta RAL 8003 (leverancier De IJssel Coatings)

Uitharding: 2% Trigonox 249 (leverancier Nouryon, voorheen Akzo Nobel)

Temperatuur: 20 °C

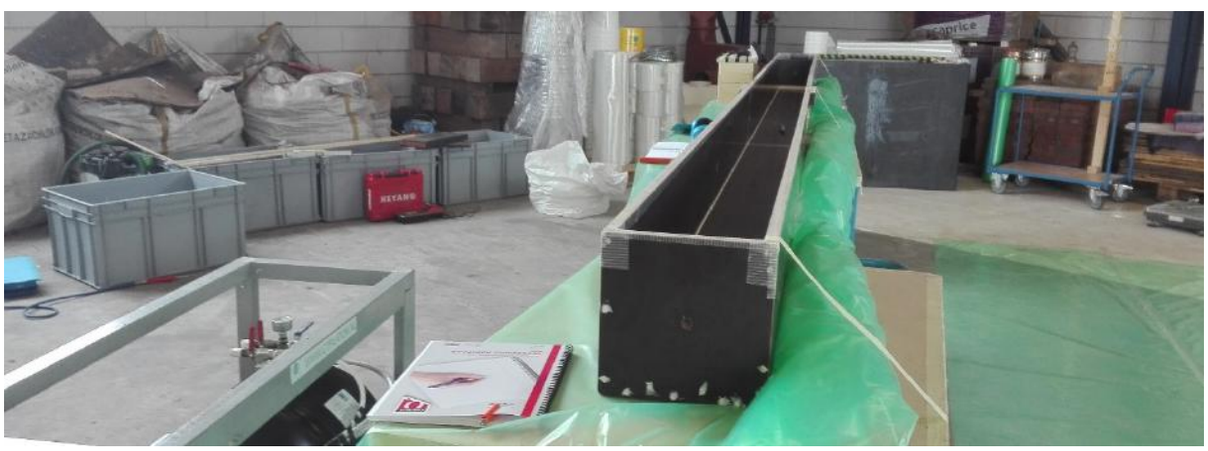
Productie balken voor dragline-schot (grondstofgebruik in kg)

	Balknummer	1	2	3	4	5	
	Balktype	**Tussen**	**Tussen**	**Midden**	**Rand**	**Rand**	
Glasvezelversterking							Gem.
UD-legsel	840 g/m^2	19,4	19,2	18,4	19,4	19,3	19,1
Quadraxiaal legsel	1200 g/m^2	11,1	11,2	10,7	11,3	11,1	11,1
Injectiemat	900 g/m^2	2,3	2,2	1,9	2,1	2,2	2,1
Continu-mat	450 g/m^2	1,2	1,1	1,1	0,9	0,9	1,0
Totaal aan glasvezelversterking		34,0	33,7	32,1	33,7	33,5	33,4
Hergebruikt composiet							
Grove vlokken		0,0	0,0	39,8	22,1	12,0	14,8
Fijne vlokken		100,6	89,0	52,7	63,8	73,9	76,0
Droog zand (grof + fijn, 1:1)		50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Totaal aan droge componenten		184,6	172,7	174,6	169,6	169,4	174,2
Harsmengsel (aangemaakt)							
Polyesterhars	Synolite 1967-G-3	123,1	130,0	123,6	131,0	130,4	127,6
Pigment	RAL 8003	2,5	2,6	2,5	2,6	1,7	2,4
Peroxide	Trigonox T249	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6
Totaal aangemaakt harsmengsel		128,1	135,2	128,6	136,2	134,7	132,6
Gewogen gewicht balk		300,0	296,0	274,0	302,0	292,0	292,8
Netto harsgebruik voor balk		115,4	123,3	99,4	132,4	122,6	118,6
Verloren hars voor proces		12,7	11,9	29,2	3,8	12,1	13,9
Gewichtspercentages (in %)							
Glasvezelversterking		11,3	11,4	11,7	11,2	11,5	11,4
Hergebruikt composiet		33,5	30,1	33,8	28,4	29,4	31,0
Droog zand		16,7	16,9	18,2	16,6	17,1	17,1
Harsmengsel		38,5	41,7	36,3	43,8	42,0	40,4

Productie-inrichting



Houten mal met de foliestrook eronder geplaatst op karren



Vacuum-pomp



Tijdig starten met voorverwarmen van de blikken met hars tot 22 °C



Start met peelply, injectiemat, Quadraxiaal versterkingslagen en UD-lagen





Doorvoeren buizen en proppen voor sparingen in balk









Vlokken afgewogen in blikken en emmers



Aanleggen spiraalslang tussen twee stroken continumat op eerste laag vlokken en zand





Tweede hoeveelheid vlokken en zand aanbrengen en aantrillen voor compactie





Dichtvouwen lagen aan bovenzijde





Deksel plaatsen en aansluitingen voor afvoer lucht naar vacuumpomp op deksel





Folie luchtdicht om mal afsluiten





Aanbrengen vacuum



Injectie





Lossen door ontkisten van de mal



Afwerken en wegleggen





Appendix 3 Deelnemers project

Deelnemerslijst RAAK-project Industrieel hergebruik van composieten		
Organisatie	**Naam contactpersoon**	**Mailadres**
Aliancys	Menno Claase	menno.claase@aliancys.com
Biinc	Ben Drogt	info@biinc.nl
Bijl Profielen (nu Krafton)	Peet Bijl	peet@bijlprofielen.nl
	Luuc van Breda	luuc@bijlprofielen.nl
Bootjessloperij 't Harpje	Bram van der Pijl	info@bootdump.nl
Brimos Duurzame Energie	Hans te Siepe	hans.tesiepe@brimos.nl
Certion	Bart Thiele	b.thiele@certion.nu
Composiet Service Assen	Henk Tebbertman	henk@composiet-service.nl
Composite Structures	Geert Siereveld	info@compositestructures.nl
CT-platon	Dennis Stuy	composites@ctplaton.nl
Demacq	Cora Burger	cora.burger@demacq.nl
	Hans Kelderman	hans.kelderman@demacq.nl
Fatol	Wim Brink	w.brink@fatol.nl
Federatie NRK	Martin van Dord	vandord@nrk.nl
Fiby Products	Derk-Jan Weeke	derkjanweeke@mfemmen.nl
Flexxcon	Jos Lechner	jos@flexxcon.com
	Pieter van der Sluis	pieter@flexxcon.com
Future Pipe Industrie	Han Leurink	H.Leurink@futurepipe.com
Gemeente Zeewolde	John de Vries	j.devries@zeewolde.nl
Groningen Seaports	Henk Blaauw	h.blaauw@groningen-seaports.com
	Bart van der Kolk	b.vanderkolk@groningen-seaports.com
	Geert Jan van Woggelum	g.vanwoggelum@groningen-seaports.com
MLS Management	Marie-Louise van de Sande	mlsmanagement@kpnmail.nl
NedTrain	Ilse de Vos-van Eekeren	ilse.devosvaneekeren@nedtrain.nl
NJI	Gerwin Klok	klok@metaalunie.nl
Nouryon (voorheen Akzo Nobel)	Auke Talma	auke.talma@akzonobel.com
	Gea Spijkerman	gea.spijkerman@nouryon.com
	Roel Zuijderduin	roel.zuijderduin@nouryon.com
NRK	Martin van Dord	vandord@nrk.nl
NS	Ilse de Vos-van Eekeren	ilse.devosvaneekeren@nedtrain.nl
Polem	Sjouke Bus	sbus@polem.nl
	Stefan Andersson	SAndersson@polem.nl
Poly Products	Jan Schrama	schrama@polyproducts.nl
Provincie Groningen	Jan Hiddingh	j.hiddingh@provinciegroningen.nl
Reimert Bouw & Infra	Bas Reimert	htbreimert@reimert-almere.nl
Remondis	Hylke de Wit	hylke.dewit@remondis.nl
Rijkswaterstaat	Johan de Boon	johandeboon@live.nl
Royal Haskoning DHV	Liesbeth Tromp	liesbeth.tromp@rhdhv.com
	Sietze Bijker	sietz.bijker@rhdhv.com
Spaghnum	Nick van de Griendt	navdgriendt@sphagnum.nl
S-Pod	Harrie van Leeuwen	harrie@s-pod.nl
TenCate Advanced Composites	Richard Bergman	r.bergman@tencate.com
TU Delft	Sotiris Koussios	s.koussios@tudelft.nl
Waterschap Zuiderzeeland	Siep Bultje	s.bultje@zuiderzeeland.nl
VDL Wientjes BV	Hans Meuleman	h.meuleman@vdlwientjesemmen.nl
	Hans Schiphouwer	h.schiphouwer@vdlwientjesemmen.nl
Welex	Emiel Koolmees	e.koolmees@cm-ind.com

Lijst van betrokken onderzoekers Windesheim		
Organisatie	**Naam contactpersoon**	**Mailadres**
Windesheim	Peter Bosman	p.bosman@windesheim.nl
Windesheim	Pieter Schreuder	p.schreuder@windesheim.nl
Windesheim	Eric Roetman	ec.roetman@windesheim.nl
Windesheim	Margie Topp	m.topp@windesheim.nl
Windesheim	Koen Hermans	kw.hermans@windesheim.nl
Windesheim	Robbie Woldendorp	r.woldendorp@windesheim.nl
Windesheim	Ruud Groen	r.groen@windesheim.nl
Windesheim	Jasper Bouwmeester	jasper.bouwmeester@fiberneering.com
Windesheim	Wendy van Schooten	dwm.van.schooten@windesheim.nl

Appendix 4 Studentenopdrachten

De volgende deskstudies over hergebruik van composieten zijn uitgevoerd:

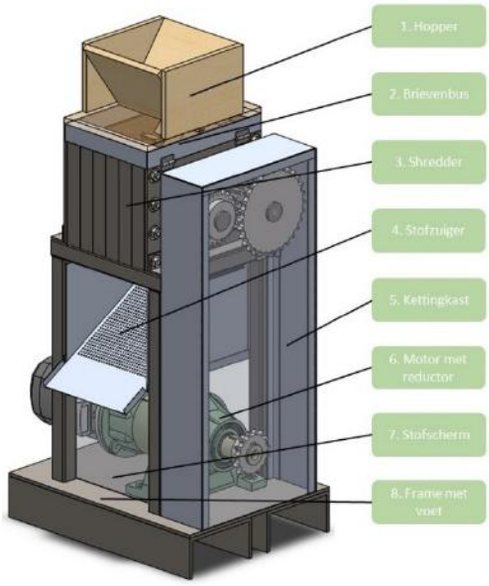
De perfecte vlok	Lennard Garcia Villamor
Spaanders	Sebastiaan Oudendijk
To shred or not to shred	Jotham Cohn
Maximale lengte vlok voor processen	Simon Crijns
De ideale vlok	Sanne Lahm
De ideale vlok-verhouding	Joran Strijker
Kosten hergebruik composieten	Wouter Schoenmakers
Proces voor productie hergebruikt composieten	Leandra Krasse
OSB-proces voor EoL composieten	Sander van Aken
Industrieel hergebruik van composieten	Stefan Holtland
Gerecycled kunststof t.o.v. gerecycled composiet	Anne Veen
Recycling of composites: a success?	Maarten Klaversteijn
Putdeksels met een kern van EoL composiet	Mart van Rijn
Inspectie en reparatie van hergebruikt composiet	Wouter Theijsse
Kruipverwachting van GSVK	Thomas Wirtz
Mogelijkheden van wikkelen bij hergebruik	Jozef Janusch
Langeduur-eigenschappen hergebruikt composiet	Bram van der Kolk
Recycled composiet t.o.v. metalen	Koen Schuurman
Hergebruikt composiet in de bouwsector	Remco Rookhuysen
Hergebruikt composiet in zwembadsector	Jelte van Ruiten
Hergebruikt koolstofcomposiet	Quint Top
Hergebruikt composiet in offshore en industrie	Tom Gootjes
Hergebruikt composiet in transportsector	Niek Kuilder
Damwanden voor oeverbeschoeiing	Daan Hoepman
Hergebruikt composiet in tuin- en straatmeubilair	Luuk Kappers
Dragline-schotten	Koen Peters
Recycled High Pressure Laminate	Mitch Nai Chung Tong
Hergebruikt composiet voor dekken en steigers	Nathal van Werd
Hergebruikt composiet in spoorbielzen	Auke van der Sluis
Putdeksels	Stephan Reinders

Afstudeerders (5)

Tijdens het project zijn vijf afstudeeropdrachten uitgevoerd. Hieronder volgt een korte beschrijving van hun werk, waarvan onderdelen eerder in het rapport uitgebreider zijn beschreven. Het desbetreffende afstudeerverslag staat genoemd in de literatuurlijst.

Jotham Cohn
'Break Stuff' (2018)

In dit afstudeerwerk is onderzocht op welke wijze EoL composieten het beste vershredderd kunnen worden, gevolgd door het ontwerp, realisatie en test van een prototype shredder. Dit afstudeerwerk was zeer goed en kreeg een 9 als cijfer.





Lennard Garcia Villamor
'Continu-productieproces voor damwanden uit hergebruikt composiet' (2018)

Lennard heeft onderzocht op welke wijze hergebruikt composiet kan worden verwerkt tot nieuwe producten middels een continu-productieproces. Vervolgens heeft hij een werkende prototype-opstelling ontworpen, gebouwd en getest. Dit afstudeerwerk was van uitstekende kwaliteit en bekroond met het cijfer 9,5.



Thomas Camping
'Optimization of a Composite Beam with a Reused Composite Hybrid Core' (2019)

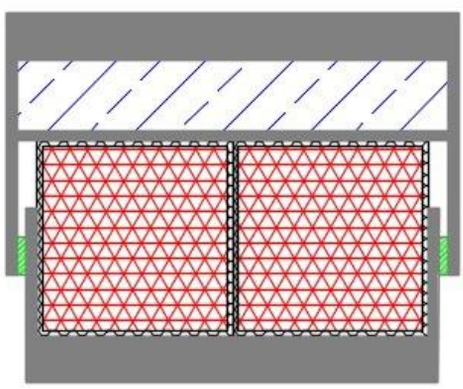
Thomas heeft onderzocht of een massieve kern van hergebruikt composiet kan worden opgebouwd als een hybride opbouw. Hij heeft daartoe een dergelijke opbouw mechanisch geanalyseerd en hij heeft een hybride draagligger op basis hiervan ontworpen, vervaardigd en getest op sterkte.





Caner Demirci en Raoul Laetemia
Hybride ligger (2019)

Caner en Raoul zijn verder gegaan met het ontwerpen en maken van een hybride opbouw van een draagligger die gedeeltelijk is opgebouwd uit een thermoset deel (waarvan een deel vervaardigd was van hergebruikt composiet) en een thermoplast deel (waarvan een deel vervaardigd was van afval-plastic. Hierbij hebben ze de balk zodanig samengesteld dat bij een end-of-life situatie van de balk de thermoset- en thermoplast-delen weer goed te scheiden zijn.





Stagiaires (2)

Twee stagiaires van de studierichting werktuigbouwkunde hebben opdrachten uitgewerkt op deelaspecten van het project.

Allard Grendelman
Project Composite2
Stageverslag, Windesheim, 2018

Allard heeft onderzocht op welke wijze geshredderd composiet kan worden gesorteerd tot verschillende fracties (grades). Op basis hiervan heeft hij een prototype sorteeropstelling gebouwd en getest.



Jansen, R.
Hergebruikt composiet in dragline-schotten
Stageverslag, Windesheim, 2019

Richard heeft een tijdelijke productieruimte ingericht bij Welex in Lexmond en heeft daar samen met 4 onderzoekers van het lectoraat 5 balken geproduceerd en vervolgens hiermee een dragline-schot van 1 x 5 meter samengesteld en getest.



Groepsopdrachten in minor programma's (3)

Mark Hekman en Jeroen Put
Composieten shredden en sorteren, 2019
Opdracht Minor Production

Bob Kiers, Twan Kalthof en Nina op 't Ende
Eindverslag Pultrusie
Minor-opdracht Minor Production, 2019

Jena Katharina Klein en Reza Imamkhan
Mechanical Properties of a Sandwich Beam
Minor-opdracht Applied Mechanics, 2019

Studentopdrachten buiten Windesheim

Vanuit Hogeschool Zeeland heeft een afstudeerstudent Civiele Techniek een constructie ontworpen van profielen op basis van hergebruikt composiet.

Een afstudeerstudent van de afdeling Industrial Ecology van de TU-Delft heeft het lectoraat benaderd voor informatie over hergebruik van composieten voor de afstudeeropdracht op het gebied van recycling van windturbine-rotoren.

Naar aanleiding van ons artikel in Reinforced Plastics heeft de MES College of Engineering in Kuttipparam (India) ook de methode van hergebruik ter hand genomen voor opdrachten van zes afstudeerderstudenten.

-

Literatuur

Bijker, S., Tromp, L., Siereveld, G.
Duurzame aanpak Dinzerbrug: Dekplanken van vezelversterkt kunststof
Civiele Techniek, Nummer 4, 2019

Bouwmeester, J.
Hergebruik van thermoharde composieten – Onderzoek naar verwerking van vlokken als grondstof voor VVK-OSB
Rapport Lectoraat Kunststoftechnologie: LKT-RE-106206-1702, maart 2017.

Busschen, A. ten
Revolutionary re-use of polyester boats
The Report, Issue 81, September 2017

Busschen, A. ten
Remanufacturing of EoL thermoset composites into retaining walls
3rd International Composites Conference (ICC), Stuttgart, 19 September 2017

Busschen, A. ten
Structural re-use of end-of-life thermoset composites
Reinforced Plastics, Volume 61, No. 3, May/June 2017

Busschen, A. ten
Boten en rotors hergebruiken als oeverbeschoeiingsplank
Kunststof & Rubber, No. 4, 2017

Busschen, A. ten
Afgedankte plezierjachten in nieuwe oeverbeschoeiing – Windesheim onderzoekt hergebruik composiet.
Jachtbouw Nederland 6, december 2016

Busschen, A. ten
Structural Re-Use of End-of-Life Thermoset Composites
SAMPE Europe Conference 2016, 13-15 September 2016, Liège.

Busschen, A. ten , Bouwmeester, Bosman, P., J., Schreuder, P.
Hergebruik van thermoharde composieten – Onderzoek van mogelijke producten en toepassingen
Rapport Lectoraat Kunststoftechnologie: LKT-RE-106029-1602, augustus 2016.

Busschen, A. ten , Bouwmeester, J., Schreuder, P.
Hergebruik van thermoharde composieten – Onderzoek van afvalproductsoorten
Rapport Lectoraat Kunststoftechnologie: LKT-RE-106027-1601, mei 2016.

Camping, T.C.M.
Optimization of a Composite Beam with a Reused Composite Hybrid Core.
Concept afstudeerverslag, Windesheim 2019

Centrum Hout
Bomen over Oriented Strand Board – OSB
Informatiebrochure, 2011

Cohn, J.
To shred, or not to shred
Deskstudy-verslag, Windesheim 2018

Cohn, J.
Break Stuff
Afstudeerverslag Windesheim 2018

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

Demirci, C., Laetemia, R.
Hybride ligger
Concept afstudeerverslag, Windesheim 2019

Garcia Villamor, L.
De perfecte vlok
Deskstudy-verslag, Windesheim 2018

Garcia Villamor, L.
Continu-productieproces voor damwanden uit hergebruikt composiet
Afstudeerverslag Windesheim, 2018

Guravage, S.
Composiet damwand
Stageverslag Windesheim 2017

Halliwell, Sue
'Fibre reinforced polymers in construction: durability',
BRE-Report IP10/03, 2003

Hekman, M., Put, J.
Composieten shredden en sorteren
Verslag minor-opdracht Minor Production, Windesheim, 2019

Hoff, N.J., Mautner, S.E.
Buckling of Sandwich Type Panels
Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 12, No. 3: 285-297, 1945

Jansen, R.
Hergebruikt composiet in dragline-schotten
Stageverslag, Windesheim, 2019

JEC Composites (2017)
Overview of the Global Composites Market – at the crossroads; www.jeccomposites.com/about-jec/press-releases/facts-figures-and-trends-in-composites-market-analysed-in-overview-of-the-global-composites-market

Kiers, B., Kalthof, T., Op 't Ende, M.
Eindverslag Pultrusie
Verslag minor-opdracht Minor Production, Windesheim, 2019

Klein, J.K., Imamkhan, R.
Mechanical Properties of a Sandwich Beam
Verslag minor-opdracht Applied Mechanics, Windesheim, 2019

Koelega, J.
Recycling Wind Turbine Blades
Graduation Thesis, MSc Industrial Ecology, TU-Delft, March 2019
Moor, M. de
Kouhardende Kunststoffen
Antilope Printing, 2009, ISBN 978-90-81490-90-0

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

Nijssen, R.P.L.
Composieten – Basiskennis
Hogeschool InHolland, 2013, ISBN 973-90-77812-45-7

Okino, E. Souza, M. (2004)
Evaluation of the physical and biological properties of particleboard and flakeboard made from Cupressus spp; International Biodeterioration & Biodegradation 53(1):1-5 · January 2004

OVAM (2016) Potentieelinschatting en marktonderzoek naar hergebruik en hoogwaardige recyclage voor vezelversterkte thermoharders; https://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/Potentieelinschatting-thermoharders-DEF-2016.pdf

Painter, G. Budman, H. Pritzker, M. (2005) Prediction of oriented strand board properties from mat formation and compression operating conditions. Part 2: MOE prediction and process optimization; Wood Science and Technology; April 2006, Volume 40, Issue 4, pp 291–307

Rasheed, Abdul, M.I. (2016)
Compression Molding of Chopped Woven Thermoplastic Composite Flakes;
https://ris.utwente.nl/ws/files/6047629/thesis_M_Abdul%20Rasheed.pdf

Schreuder, P., Hermans, K., Busschen, A. ten
Hergebruik van thermoharde composieten – Onderzoek naar verwerken van end-of-life producten tot versterkingselementen.
Rapport Lectoraat Kunststoftechnologie: LKT-RE-106030-1701, januari 2017.

Thomason, J., Jenkins, P., Yang, L. (2016)
Glass Fibre Strength – A review with Relation to Composite Recycling
Fibers 2016, 4, 18

Thomason et al. 2016,
Can thermally degraded glass fibre be regenerated for closed-loop recycling of thernmosetting composites?
Compos Part A Appl Sci Manuf 2015; 72: 167-74

Lectoraat Kunststoftechnologie

Industrieel hergebruik van EoL thermoharde composieten

Over 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 een technisch-economisch haalbare oplossing gevonden voor hergebruik van end-of-life thermoharde composieten. De lange-duur eigenschappen van composieten zijn tijdens hun levensduur een voordeel maar in de circulariteit een groot probleem. De reeds ontwikkelde methodiek gaf hiervoor al een technische oplossing. De grote vraag was vervolgens: kan het op een industriële schaal worden toegepast? Deze praktijkvraag is behandeld aan de hand van een vijftal demonstrators met een groot consortium van 36 partners, onderzoekers van het lectoraat en studenten.

SIA Regieorgaan

hogeschool Windesheim