



Potentieelinschatting en marktonderzoek naar hergebruik en hoogwaardige recyclage voor vezelversterkte thermoharders



Vlaanderen
is materiaalbewust

SAMEN MAKEN WE
MORGEN MOOIER

OVAM

**Potentieelinschatting en
marktonderzoek naar
hergebruik en
hoogwaardige recyclage
voor vezelversterkte
thermoharders**



Documentbeschrijving

1. *Titel publicatie*

Potentieelinschatting en marktonderzoek naar hergebruik en hoogwaardige recyclage voor vezelversterkte thermoharders

2. *Verantwoordelijke Uitgever*

Danny Wille, OVAM, Stationsstraat 110, 2800 Mechelen

3. *Wettelijk Depot nummer*

4. *Aantal bladzijden*

98

5. *Aantal tabellen en figuren*

63 figuren, 12 tabellen

6. *Prijs**

7. *Datum Publicatie*

september 2016

8. *Trefwoorden*

vezelversterkt, thermoharders, composiet, hergebruik, recyclage, marktonderzoek

9. *Samenvatting*

Dit rapport heeft een beeld van de huidige markt voor vezelversterkte thermohardende kunststoffen op het vlak van toepassingen, gebruikte materialen en hoeveelheden, productietechnieken en verwerkingsopties voor de afvalstoffen. Daarnaast probeert het rapport ook een inschatting te maken van de marktevoluties die we op korte termijn mogen verwachten voor dergelijke materialen. Het rapport wordt afgesloten met een aantal beleidsaanbevelingen die tot doel hebben te komen tot meer hoogwaardige recyclage van deze vezelversterkte thermohardende kunststoffen.

10. *Begeleidingsgroep en/of auteur*

OVAM, consortium Vito, Centexbel-VKC en Sirris (Manshoven S., De Vriese L., Grymonprez W., Vandenhoute T., Vanderreydt I., Waeyenbergh B.)

11. *Contactperso(n)en*

Gwen Dons (015 284 354, gwen.dons@ovam.be)

12. *Andere titels over dit onderwerp*

Gegevens uit dit document mag u overnemen mits duidelijke bronvermelding.

De meeste OVAM-publicaties kunt u raadplegen en/of downloaden op de OVAM-website: <http://www.ovam.be>

Inhoudstafel

	Samenvatting	7
	Executive summary	13
1	Inleiding	19
2	Vezelversterkte thermoharders	23
2.1	Inleiding	23
2.1.1	Wat is een composiet?	23
2.1.2	Inleiding op basis van versterkende structuur	23
2.1.3	Indeling op basis van matrixmateriaal	24
2.2	Productie van vezelversterkte thermoharders	25
2.2.1	Productieprocessen	25
2.2.2	Eigenschappen	28
2.3	Toepassingsgebieden	29
2.3.1	Industriële producten	30
2.3.2	Bouwsector	30
2.3.3	Publieke sector	31
2.3.4	Consumentengoederen	31
2.3.5	Energie sector	32
2.3.6	Automobiel- en transportsector	32
2.3.7	Elektronica sector	33
2.4	Marktspelers in België en Vlaanderen	33
2.5	Productievolumes en marktprijzen	35
2.5.1	Op basis van versterkingsvezels	35
2.5.2	Op basis van matrixmateriaal	39
2.5.3	Op basis van productieproces	39
2.5.4	Op basis van toepassing	41
2.6	Waardeketen van vezelversterkende thermoharders	43
3	Afvalstromen van vezelversterkte thermoharders	47
3.1	Inleiding	47
3.2	Afvalstromen van glasvezelversterkte composieten	47
3.2.1	Productieafval	47
3.2.2	EoL-afval	48
3.3	Afvalstromen van koolstofvezelversterkte composiet	55
3.4	Overzicht afvalstromen	55
4	Recyclage van thermohardende composieten	57
4.1	Recyclageprocessen	57
4.1.1	Mechanische recyclage	58
4.1.2	Chemische recyclage	60
4.1.3	Thermische recyclage	61
4.1.4	Gebruik van gerecycleerd materiaal in producten	63
4.1.5	Stand van het onderzoek	67
5	Verlengen van de gebruiksfase voor thermohardende composiet materialen	73
5.1	Herstelling	73
5.1.1	Enkele voorbeelden	73
5.1.2	Technieken	75
5.2	Her-manufacturing	78
5.3	Duurzaam design – nieuwe businessmodellen	79
6	Recyclage en hergebruik van thermohardende composieten: wat is het potentieel voor België?	81
6.1	Te verwachten afvalvolumes en recyclagepotentieel	81
6.2	Barrières	82

6.3	Milieu-impact	83
7	Aanbevelingen	87
Bijlage 1:	Lijst van tabellen	91
Bijlage 2:	Lijst van figuren	93
Bijlage 3:	Bibliografie	95
Bijlage 4:	Resource efficiency action plan (REAP) voor de composietsector (VK)	97

Samenvatting

In deze studie wordt onderzocht hoe de materialenkringloop van thermohardende composieten beter kan worden gesloten op een functionele, hoogwaardige en duurzame manier.

Vezelversterkte thermoharders: productievolumes en afvalvolumes

Meer dan 90% van de thermoharders is gebaseerd op glasvezel (Glass Fibre Reinforced Polymers, GFRP), gevolgd door koolstofvezel (Carbon Fibre Reinforced Polymers, CFRP). De markt van koolstofvezelversterkte materialen is een sterke groeiende markt, waardoor er in de toekomst vermoedelijk meer en meer van deze materialen zullen vrijkomen. Polyester is het dominante thermohardende matrixmateriaal. Andere veel gebruikte matrixtypes voor thermoharders zijn vinylester, epoxy en fenolharsen.

Vezelversterkte thermoharders worden in een breed scala van toepassingen gebruikt. Vooral het lichte gewicht en de hoge sterkte zijn sterke argumenten om composietmaterialen te gebruiken. Binnen Europa liggen de voornaamste toepassingen van glasvezelversterkte composieten in de transport- en bouwsector. Koolstofvezelversterkte composieten worden voornamelijk gebruikt in aerospace toepassingen, transport- en sportartikelen.

Productievolumes

De globale markt voor glasvezelversterkte composieten vertegenwoordigt meer dan 8 miljoen ton aan materialen, waarbij het merendeel thermoharder gebaseerd is. Binnen Europa is Duitsland de belangrijkste producent van glasvezelversterkte composieten, met een totaal productievolume van 200 kton in 2014. Daarnaast werd in 2014 wereldwijd ca. 125.000 ton koolstofvezelversterkte composieten geproduceerd. Slechts 19% hiervan werd geproduceerd in Europa (Hongarije, Duitsland, Frankrijk en het VK). Ca. 35% van de wereldproductie (36.800 ton) is wel bestemd voor de Europese markt.

Het aantal productiebedrijven van vezelversterkte thermoharders in Vlaanderen wordt geschat op 200, waarvan meer dan 90% KMO. De meeste bedrijven leveren maatwerk producten en produceren op ambachtelijke wijze. Ca. 20% van de bedrijven werkt op basis van geautomatiseerde productielijnen. Op basis van de uitgevoerde sectorbevraging kan worden ingeschat dat de Belgische productie aan glasvezelversterkte composieten ca. 20 kton per jaar bedraagt. Er zit echter een grote onzekerheid op dit cijfer door de beperkte transparantie van de sector en het gebrek aan concrete data. Het volume koolstofvezelversterkte composieten bedraagt hier slechts een fractie van, maar concrete cijfers konden niet worden teruggevonden. Wel kan gesteld worden dat ca. 90% van de Belgische composietproductie bestemd is voor export.

Afvalvolumes en selectieve inzameling

Voor 2015 werd geschat dat de hoeveelheid composietafval in de EU 53.000 ton productieafval en 251.000 ton EoL-afval bedraagt. In België zijn de huidige afvalvolumes eerder beperkt: zo'n 4.000 ton productie-afval en zo'n 6.000 ton EoL-afval van glasvezelversterkte composieten kwamen vrij in 2015. In de toekomst zullen deze volumes waarschijnlijk geleidelijk aan toenemen. Over de afvalstromen van koolstofvezelversterkte composieten werden geen richtcijfers teruggevonden. Deze volumes bedragen echter slechts een fractie van de hoeveelheid glasvezelafval.

Het merendeel van de EoL-afvalstromen wordt op dit ogenblik niet selectief ingezameld, maar komt terecht in het restafval of bij het grof vuil. Ook een aanzienlijk deel van het productie-afval

(voornamelijk vanuit kleinere bedrijven) wordt momenteel niet gescheiden ingezameld, maar via het gemengd bedrijfsafval afgevoerd. Hierdoor wordt de eventuele recyclage van de composietmaterialen uit deze afvalstromen fel bemoeilijkt. Anderzijds is de selectieve inzameling van deze stromen logistiek weinig interessant, omdat het vaak om relatief kleine hoeveelheden gaat die bovendien zeer divers kunnen zijn en zeer verspreid kunnen vrijkomen bij kleine bedrijven, herstellateliers en consumenten, waardoor het zowel praktisch als economisch niet haalbaar is om hier aparte containers voor te voorzien.

Afvalstromen met het meeste potentieel voor recyclage zijn **zuivere, homogene stromen** die in relatief grote volumes vrijkomen, zoals productie-afval uit grote bedrijven, EoL-windmolens en EoL-vliegtuigen. In België gaat het hierbij om 2.000 tot 3.000 ton productieafval op jaarbasis. Daarbij komen in de toekomst (vanaf 2025-2030) mogelijk 2.000 tot 3.000 ton EoL windmolens per jaar. Hierbij dient wel de kanttekening gemaakt dat deze windmolens typisch onder service-contracten met buitenlandse (meestal Franse) firma's vallen (aangezien er momenteel geen producenten of herstellende van windmolens in België actief zijn). Het is hierdoor dus niet zeker dat de afvalstromen die gepaard gaan met de herstelling en afbraak van deze windmolens effectief op de Belgische markt zullen vrijkomen.

Momenteel wordt een aanzienlijk deel van deze zuivere afvalstromen verwerkt via co-processing in de cementindustrie, waarbij wordt uitgegaan van ca. 70% materiaalrecyclage (grondstofvervanger in cement) en ca. 30% thermische valorisatie (vervanging van fossiele brandstoffen in de oven). Hierbij gaan de specifieke versterkende eigenschappen van de composieten echter verloren.

Composieten die **verwerkt zijn in producten** waarvoor reeds een recyclageroute bestaat (bv. verwerking van ELV's en AEEA), komen typisch in de restfractie van deze recyclageroute terecht en worden ingezet voor energierecuperatie, aangezien de bestaande verwerkingsinstallaties voornamelijk gericht zijn op de recyclage van andere materialen, zoals metalen en thermoplasten. Selectieve ontmanteling of uitsortering van de composieten gebeurt momenteel niet, gezien de kosten van demontage, de beperkte volumes composiet, de grote variabiliteit in aard en voorkomen, de moeilijke identificatie en de beperkte waarde van recyclaat. Door het toenemend gebruik van hoogwaardige materialen (o.a. koolstofvezelversterkte composieten), kritische metalen en waardevolle componenten (bv. batterijen) in lichte (elektrische) voertuigen kan het in de toekomst mogelijk wel interessanter worden om voor deze voertuigen andere verwerkingsprocessen op te starten die meer gericht zijn op hoogwaardige materiaal- en componentrecuperatie, met meer nadruk op demontage (om bv. volledige onderdelen te hergebruiken) en minder shreddering. In een dergelijk scenario kan ook de recuperatie van thermohardende composieten uit EoL voertuigen economisch interessanter worden. Voorwaarde is uiteraard dat ook bij het ontwerp van voertuigen rekening wordt gehouden met een vlotte scheiding van de verschillende materialen bij einde-leven, onder meer door een goede identificatie van verschillende materialen, een beperkte variabiliteit in de aard van de gebruikte materialen en een ontwerp dat gericht is op vlotte demontage. Dit vereist uiteraard een betere samenwerking doorheen de hele waardeketen van deze voertuigen.

Mogelijkheden voor functionele en hoogwaardige recyclage

Composietmaterialen verschillen van traditionele materialen doordat ze hun waardevolle eigenschappen in belangrijke mate ontleen aan hun fysische structuur en de ordening van de verschillende samenstellende grondstoffen. Composieten kunnen in dat opzicht eerder als 'component' beschouwd worden. Hierdoor vormt hoogwaardige en functionele recyclage (recyclage waarbij de functionaliteit van de oorspronkelijke composiet zo goed mogelijk behouden blijft) van deze materialen een bijzondere uitdaging. Traditionele recyclagemethodes zijn immers meestal gericht op mechanische verkleining en sortering in vrij homogene materiaalstromen (vaak gevolgd door hersmelting). In het geval van composieten is er per definitie een heterogene materiaalstroom (een mix van matrix en vezels) en leidt het vermalen ervan tot verlies van de kenmerkende structuur en dus een (gedeeltelijk) verlies van functionaliteit. Bij thermohardende composieten speelt bovendien nog het bijkomende probleem dat thermohardende kunststoffen niet hersmolten kunnen worden tot nieuwe onderdelen (in

tegenstelling tot thermoplasten, die wel tot nieuw granulaat kunnen worden verwerkt). Recyclage van deze materialen gaat dus steeds gepaard met enig verlies in functionaliteit.

De recyclagetechnieken voor thermohardende composieten kunnen gegroepeerd worden in 3 groepen:

- Mechanische recyclage, waarbij de volledige composiet wordt vernalen tot een fijn poeder of een grover granulaat dat als vulstof (vervangmiddel voor bijvoorbeeld CaCO_3) kan worden gebruikt. Hierbij gaan de versterkende eigenschappen die te danken zijn aan de combinatie van vezels in een matrix (deels) verloren. Dit is een mature verwerkingsroute, maar het resulterend recyclaat heeft slechts een lage marktwaarde;
- Chemische recyclage, waarbij het polymeer (de matrix) opgelost (solvolyse) of afgebroken (bv. via sub-kritische water hydrolyse) wordt en de vezels teruggewonnen kunnen worden. Deze piste recupereert dus enkel de vezels, die meestal wel verkorten in het proces, waardoor ze in nieuwe, minder veeleisende toepassingen kunnen worden ingezet. Solvolyse en andere chemische recyclagetechnieken zijn echter nog niet erg matuur;
- Thermische recyclage, waarbij de vezels worden teruggewonnen via pyrolyse of andere thermische processen. Ook hier is er meestal kwaliteitsverlies. Deze route is ook nog in onderzoeksfase.

Co-verwerking in een cementoven is een specifieke vorm van thermische recyclage: hierbij wordt de calorische waarde van de matrix benut als brandstof, terwijl de niet-brandbare vezels als grondstof (vulstof) in het cement terechtkomen. Deze route is matuur en wordt veel toegepast. Door de European Cement Association (CEMBUREAU) wordt co-processing vooruit geschoven als de beste optie om glasvezelversterkte thermoharders te recyclen.

Hoogwaardige, functionele recyclage van thermohardende composieten is gericht op het zo goed mogelijk behouden van de oorspronkelijke functionaliteit van het composietmateriaal. In de praktijk betekent dit de mechanische recyclage van volledige composieten tot granulaten met (gedeeltelijk) behoud van versterkende eigenschappen (waarbij het recyclaat ook benut kan worden in nieuwe composieten of in toepassingen waarbij het recyclaat bijdraagt aan de sterkte) en de recyclage van vezels via thermische of chemische processen. Rond chemische en thermische processen gebeurt reeds heel wat onderzoek, maar deze processen zijn meestal nog niet erg matuur. Er zijn in Europa wel enkele startup bedrijven actief op vlak van recyclage van koolstofvezels. Mechanische recyclage is wel matuur, maar de markt voor dit type recyclaat is nauwelijks ontwikkeld. Vaak wordt dit recyclaat eerder laagwaardig ingezet als vulstof, waarbij eventuele sterkte-eigenschappen die nog aanwezig zijn uiteindelijk niet of nauwelijks worden benut in de nieuwe toepassing. In dergelijk geval kan men dan ook niet echt spreken van hoogwaardige en functionele recyclage. Ook bij co-processing in cementovens gaat de oorspronkelijke functionaliteit deels verloren.

Hoewel er dus mature recyclageroutes voor handen zijn en er heel wat onderzoek plaatsvindt, gebeurt composietrecyclage in de praktijk zeer weinig en komen afvalstromen meestal bij het restafval terecht. De barrières zijn vooral economisch (kosten-baten) en marktgerelateerd (gebrek aan marktvraag voor recyclaat of onvoldoende afzetmarkt binnen de gekende mogelijkheden). Daarnaast speelt de onzekerheid op vlak van plaats en tijdstip van het vrijkomen van voldoende afvalvolumes een belangrijke rol.

Mogelijkheden op vlak van herstelling, hergebruik en her-manufacturing

Het herstellen van composietconstructies bestaat er meestal uit om de beschadigde delen te verwijderen en nieuwe composietlagen op te lamineren (via hand lay-up of vacuüm technieken). Wel kan de reparatie ertoe leiden dat de sterkte-eigenschappen van de constructie verminderen. Hergebruik en her-manufacturing gebeuren slechts sporadisch in nichetoepassingen. Er zijn wel enkele onderzoekspistes die gebruik maken van stroken van EoL composietpanelen om nieuwe onderdelen te produceren, maar ook deze pistes zijn eerder kleinschalig.

Aanbevelingen

Om het potentieel voor hoogwaardige en functionele recyclage aan te boren en te vergroten werden enkele aanbevelingen geformuleerd. Deze zijn gebaseerd op het gevoerde literatuuronderzoek en de bevraging van de Belgische sector van vezelversterkte composieten.

1. Verbeteren van de afzetmarkt en toepassingen voor recyclaten

Het grootste struikelblok voor recyclage van composieten is het ontbreken van een marktvraag naar recyclaat. Niettemin laten de recente ontwikkelingen op vlak van recyclage toe om hoogwaardige vezels te recupereren aan een lagere kostprijs dan nieuwe vezels. Bovendien kunnen granulaten met gedeeltelijk behoud van versterkende eigenschappen worden geproduceerd. Technisch en economisch is recyclage dus mogelijk, maar de aanvaarding door de sector moet nog groeien. Niettemin zal het voor bepaalde high-performance toepassingen niet realistisch zijn om de kringloop volledig te sluiten. Afvalstromen uit deze toepassingen zullen niet voor dezelfde toepassing kunnen gebruikt worden, en er zal eerder moeten gekeken worden naar herinzet binnen andere producten of sectoren. Zo kan recyclaat worden ingezet voor minder veeleisende toepassingen, bv. als versterkingsmateriaal in andere producten, zoals in vezelversterkt thermoplastisch materiaal. Bij het zoeken naar toepassingsdomeinen is het belangrijk om in te zetten op het ontwikkelen van veerkrachtige afzetroutes, die echter niet exclusief gericht zijn op gerecycleerd composietmateriaal. Gezien de beperkte volumes en variabiliteit en onzekerheid in aanvoer en kwaliteiten, is het immers niet interessant om 'vaste' afvalverwerkingsroutes op te zetten. Wel is er potentieel om bestaande (en nieuwe) productieprocessen zo te ontwerpen dat recyclaten er op een flexibele manier kunnen worden ingezet ter vervanging van primaire grondstoffen. Afhankelijk van het marktaanbod, kan dan worden overgeschakeld op recyclaat, dan wel op primaire grondstoffen.

Bovendien heeft de inzet van recyclaat als alternatieve grondstof een mogelijke invloed op het einde-leven en de recycleerbaarheid van het nieuwe product, in feite het tweede einde-leven van het composietmateriaal. Met het oog op het sluiten van kringlopen op lange termijn, wordt bij recyclagekeuzes van vandaag best ook rekening gehouden met de recyclageopties in de toekomst. Hierbij is het belangrijk om te vermijden dat bestaande kringlopen niet verstoord of bemoeilijkt worden. Zo kan het bijmengen van composietrecyclaat bij een normaalgezien zuiver (en goed recycleerbaar) materiaal (bv. een bepaalde kunststof of granulaat) op lange termijn problemen veroorzaken bij de volgende recyclagestap. Door de lange levensduur van bepaalde producten, kan deze volgende recyclagestap wel erg ver in de toekomst liggen, wat de afweging niet gemakkelijk maakt.

2. Verbetering van de selectieve inzameling en scheiding van composietafval

Het recyclagepotentieel voor composietmaterialen zit vooral in de selectieve ophaling van gelijksoortig afval binnen een beperkte regio (bv. windturbines, boten, productieafval van grote bedrijven).

Een selectieve ontmanteling van thermohardende composietonderdelen uit bepaalde producten (bv. voertuigen) kan op langere termijn ook significante volumes materiaal opleveren. Dit vereist echter een betere samenwerking doorheen de waardeketen van deze producten, omdat bij het ontwerp en de productie al rekening moet worden gehouden met een haalbare en vlotte identificatie en ontmanteling van deze onderdelen. De bevordering van product-dienst combinaties, zoals bv. de service-contracten die in de windmolensector al gangbaar zijn, kan hiervoor een sterke stimulans vormen. Dit geldt overigens niet enkel voor de terugwinning van composietmaterialen, maar bij uitbreiding voor alle materialen en in het bijzonder hergebruik of herwerking van volledige componenten. In de meeste gevallen zullen composieten op zich immers niet de economische drijfveer vormen voor het opzetten van dergelijke terugnamesystemen en gerichte afvalverwerking, maar zal het eerder de terugwinning van andere hoogwaardige materialen (bv. metalen en kritische materialen) en volledige onderdelen zijn die gerichte terugname mogelijk economisch interessant zullen maken. De selectieve terugwinning van composieten kan hier dan eveneens deel van uitmaken. Gezien het sterk

internationale karakter van de markt voor composieten en hun toepassingen, zal ook internationale samenwerking noodzakelijk zijn om de gewenste evoluties op vlak van productontwerp en de opzet van terugnamesystemen op een effectieve en werkbare manier door te voeren.

Uiteraard hangt de economische haalbaarheid van meer gescheiden inzameling en selectieve ontmanteling of uitsortering van composietmaterialen sterk samen met het uitbouwen van een concrete vraag en afzetmarkt voor het recyclelaat (zie aanbeveling 1).

3. Reglementering rond afvaltransport, opslag en verwerking (secundair belang)

Flexibele regelgeving is nodig die de drempel voor bedrijven verlaagt om afvalstromen terug te nemen, op te slaan en te verwerken binnen de productieprocessen. Bedrijven die nu materialen terugnemen worden onmiddellijk gecatalogeerd als "afvalverwerkend bedrijf". Vaak willen bedrijven om die reden alleen al geen producten terugnemen. Een versoepeling van de regelgeving hierrond, zou sommige bedrijven kunnen aanmoedigen om terugname en eventueel hergebruik/recyclage van goederen te herbekijken.

Executive summary

This study examines how the materials cycle of thermoset composites can be closed in a functional, high-quality and more sustainable way.

Fibre-reinforced thermosets: production volumes and waste volumes

More than 90% of the fibre-reinforced thermoset materials is based on glass fibre (Glass Fibre Reinforced Polymers, GFRP), followed by carbon fibre (Carbon Fibre Reinforced Polymers, CFRP). Moreover, the market for carbon fibre reinforced materials is a strong growth market, which will likely lead to an increasing amount of these materials being released in the future. Polyester is the dominant thermosetting matrix material. Other commonly used matrix types for thermosets are vinyl ester, epoxy and phenolic resins.

Fibre-reinforced thermosets are used in a wide range of applications. Especially their light weight and high strength are strong arguments for using composite materials. Within Europe, the main applications of glass fibre-reinforced composites are found in the transport and construction sectors. Carbon fibre-reinforced composites are mainly used in aerospace applications, transport and sports articles.

Production volumes

The global market for glass fibre-reinforced composites represents more than 8 million tons of materials, of which the majority is based on thermosets. Within Europe, Germany is the leading producer of glass fibre-reinforced composites, with a total production volume of 200 kilotons in 2014. Additionally, about 125,000 tons of carbon fibre-reinforced composites were produced worldwide in 2014. Only 19% of this volume was produced in Europe (Hungary, Germany, France and the UK), although about 35% of world production (36,800 tons) is destined for the European market.

The number of production plants of fibre-reinforced thermosets in Flanders is estimated at 200, of which more than 90% are SMEs. Most plants provide customized products and use artisanal production methods. About 20% of production plants have automated production lines. Based on a sector survey, it can be estimated that the Belgian production volume of glass fibre-reinforced composites is about 20 kilotons per year. However, there is a big uncertainty in this figure, due to the limited transparency of the sector and the lack of hard data. The volume of carbon fibre-reinforced composites represents only a fraction of this volume, but concrete figures could not be found. It can be stated that about 90% of the Belgian composite production is destined for export.

Waste volumes and selective collection

For 2015 it was estimated that the volume of composite waste in the EU amounts to 53,000 tons of manufacturing waste and 251,000 tons of EoL waste. In Belgium, the waste volumes are rather limited: around 4,000 tons of manufacturing waste and 6,000 tons of EoL waste glass fibre-reinforced composites were released in 2015. In the future, these volumes are likely to increase gradually. For the waste streams of carbon fibre-reinforced composites no detailed figures were found. However, this volume only represents a fraction of the amount of glass fibre-reinforced waste.

At the moment, most of the EoL composite waste is not collected selectively, but ends up in the solid waste fraction or in the bulky waste. A significant portion of the manufacturing waste (mainly from smaller companies) is currently not collected either, but discharged through the

mixed waste collection system. As a result, the recycling potential of the composite materials from these waste streams is seriously hampered. On the other hand, the selective collection of these streams is not very interesting from a logistics point of view, as it often concerns relatively small amounts, which may be very diverse in quality and location, originating from small businesses, repair workshops and consumers, making it both practically and economically infeasible to provide separate containers for selective collection.

Waste streams with the most potential for recycling are **pure, homogeneous waste streams** released in relatively large volumes, such as manufacturing waste from large companies, EoL windmills and EoL aircraft. In Belgium, this involves 2,000 to 3,000 tons of waste annually. In the future (from 2025 to 2030) this amount will possibly increase with 2000 to 3,000 tons EoL wind turbines per year. It must be noted that these windmills typically fall under service contracts with foreign (mostly French) companies (since there are no producers or repairers of windmills in Belgium). It is therefore not certain that the waste streams from repair and demolition activities of these windmills will effectively be released in the Belgian market.

Currently, a significant portion of these pure waste streams are processed through co-processing in the cement industry, assuming 70% material recycling (material substitute in cement) and 30% thermal recovery (replacement of fossil fuels in the oven). However, in this process, the specific reinforcing properties of the composites are lost.

Composites that have been **processed into products** for which a recycling process is available (e.g. treatment of ELVs and WEEE), typically end up in the residual fraction of this recycling pathway and are used for energy recovery, since the existing treatment facilities are mainly focused on the recycling of other materials, such as metals and thermoplastics. Selective dismantling or sorting of the composites is not done currently (because it is not economically feasible), given the cost of dismantling, the limited volumes of composite waste, the high variability in nature and appearance, the difficult identification and the limited value of the resulting recyclate. The growing use of high quality materials (such as carbon fibre-reinforced composites), critical metals and valuable components (e.g. batteries) in light (electric) vehicles can possibly make it more interesting in the future to launch other treatment processes for these vehicles, which will be more focused on the recovery of high performance materials and components, on dismantling (e.g. reuse of parts) and on less shredding. In such a scenario, the recovery and recycling of thermoset composites from EoL vehicles could also become economically more interesting. A precondition is that in the design of vehicles, the end-of-life scenarios are taken into account, aiming at a smooth separation of the different materials at end-of-life, by, for example, proper identification of different materials, a limited variability in the nature of the used materials and a design that is focused on easy disassembly. This obviously requires better cooperation throughout the entire value chain.

Opportunities for functional and high quality recycling

Composite materials differ from traditional materials, because they derive their valuable properties to a significant extent from their physical structure and the architecture of the various constituents. In this respect composites can be considered as 'components', rather than 'raw materials'. As a result, high-quality and functional recycling of these materials (recycling in which the functionality of the original composite is preserved as well as possible), presents a special challenge. Traditional recycling methods are mostly focused on mechanical shredding and sorting in fairly homogeneous material flows (often followed by remelting). In the case of composites, the material is, by definition, heterogeneous (a mixture of matrix and fibres) and the shredding process destroys the characteristic structure and thus leads to a (partial) loss of functionality.

Thermoset composites also face the additional problem that thermosetting plastics can not be re-melted into new parts (as opposed to thermoplastics, which can be reprocessed into new granulate). Recycling these materials is therefore always accompanied by some loss in functionality, which implies that a perfect loop closure is not feasible. Recycling technologies for thermoset composites can be grouped into 3 groups:

- Mechanical recycling, wherein the complete composite is ground to a fine powder or a coarser granulate, which can be used as a filler (a substitute for, for example, CaCO_3). The reinforcing properties of the composites are (partly) lost in this process. This is a mature processing route, but the resulting recyclate has only a low market value;
- Chemical recycling, wherein the polymer (the matrix) is dissolved (solvolysis) or degraded (e.g. via sub-critical water hydrolysis), and the fibres can be recovered. This pathway recovers only the fibres, which usually shorten in the process, meaning that they can be used in new, but less demanding applications. However solvolysis and other chemical recycling techniques are not very mature yet;
- Thermal recycling, wherein the fibres are recovered via pyrolysis or other thermal processes. Here, too, there is usually some quality loss. This route is also still in a research phase.

Co-processing in a cement kiln is a specific form of thermal recycling: in this process, the calorific value of the matrix is utilized as a fuel, while the non-combustible fibres are incorporated as a raw material (filler) into the cement. This route is mature and widely used. The European Cement Association (CEMBUREAU) puts co-processing forward as the best option to recycle glass fibre-reinforced thermosets.

High-quality functional recycling of thermoset composites aims to preserve the original functionality of the composite material as well as possible. In practice, this means the mechanical recycling of full composites into granulate in which the reinforcing properties are partly preserved (and which can be used as raw material for new composites or in applications that require reinforcement) and the recycling of fibres through thermal or chemical processes. In the area of chemical and thermal recycling already a lot of research is happening, but these processes are usually not very mature yet. In Europe a few start-up companies are already active in the field of carbon fibre recycling. Mechanical recycling is mature, but the market for this type of recyclate is not well developed. Often this recyclate is used as low grade filler material in applications that do not or hardly make use of the reinforcing properties that might still be present in the material. In such a case, one can not really speak of high quality and functional recycling. Also in the co-processing route the original functionality of the composites is partly lost.

Although there are mature recycling routes available and a lot of research is taking place, composite recycling is only a marginal activity in practice and waste streams usually end up in the solid waste fraction. The barriers are particularly economical (cost-benefit) and market-related (lack of market demand for recyclate or insufficient market demand within the known pathways). In addition, the uncertainty in terms of place and time of the release of sufficient waste volumes is an important draw-back.

Opportunities for repair, re-use and re-manufacturing

Repair of composite structures usually consists of removing the damaged parts and laminating new composite layers (through hand lay-up or vacuum techniques). However, repair can reduce the strength of the structure. Re-use and re-manufacturing occur sporadically in niche applications. There are some research projects that look into the re-use of pieces of EoL composite panels in the production of new parts, but these projects are rather small-scale.

Recommendations

The main recommendations to exploit and enhance the potential for high value and functional recycling are listed below. These are based on a literature review and a survey of the Belgian sector of fibre-reinforced composites.

1. Improving the market and applications for recyclates

The biggest stumbling block for the recycling of composites is the lack of market demand for recyclate. Nevertheless, the recent developments in the field of recycling allow to recover high quality fibre at a lower cost than virgin fibre. Also, high-quality granulates with reinforcing properties can be produced. This implies that recycling is technically and economically possible, but the acceptance by the sector should be improved. However, for certain high-performance applications it will be unrealistic to aim at completely closing the loop. Waste from these applications will not be recyclable into the same application, but it will be necessary to look for redeployment options in other products or sectors. For example, recycled material can be used for less demanding applications, e.g. as a reinforcing material in other products, such as fibre-reinforced thermoplastic material. When looking for areas of application, it is important to aim for the development of resilient recycling routes, which should not exclusively be focused on recycled composite material. Given the limited volumes, the variability and the uncertainty in supply and qualities, it is not advisable to initiate 'fixed' disposal routes. However, there is potential to (re)design existing (and new) production processes that can harbour recyclates in a flexible way replacing primary raw materials. Then, depending on the market supply, these processes can be switched to the use of recycled or primary commodities.

In addition, the use of recyclate as an alternative raw material has a potential impact on the end-of-life and the recyclability of the new product, which will be, in fact, the second end-of-life of the composite material. From the view point of closing material loops in the long term, it is advisable to take into account the recycling options in the future when making recycling choices today. In this regard, it is important to avoid disturbing or hampering existing recycling circuits. For example, the blending of recycled composite material with a normally pure (and well recyclable) material (such as a plastic or granulates) could cause long-term problems at the next recycling step. Because of the long lifespan of certain products, this next recycling step can lie in a far future, which complicates the balancing exercise between recycling benefits today and potential recycling problems in a far future.

2. Improving the selective collection and separation of composite waste

The recycling potential of composite materials depends mainly on the selective collection of waste with similar characteristics within a limited region (e.g. wind turbines, boats, manufacturing waste from large companies).

In the long term, a selective dismantling of thermoset composite components from certain products (e.g. ELV) can also yield significant volumes of material. However, this requires greater collaboration across the value chain of these products, because a viable and speedy identification and dismantling of these parts should already be accounted for in the product design and the manufacturing. The promotion of product-service combinations, such as service contracts that are already common in the wind energy sector can provide a powerful incentive for producers, users and recyclers to collaborate. This applies not only for the recycling of composite materials, but, by extension, to the recycling of all materials and, in particular, to the re-use or re-working of full-components. In most cases, composites alone will not represent enough value to provide the economic incentive for the creation of such take-back systems and targeted waste processing. It will rather be the recovery of other high-quality materials (e.g. metals and critical materials) and complete parts that have the potential to make a dedicated return-system economically interesting. Selective recovery of composites can also be a part of such a system. Given the highly international nature of the market for composite materials and their applications, international cooperation will be necessary to implement the desired changes in the field of product design and the establishment of take-back systems in an effective and workable way.

Of course, the economic feasibility of more separate collection and selective dismantling or sorting of composite materials is closely related to the development of suitable markets for recyclate (see recommendation 1).

3. Regulations on the transport, storage and processing of waste (secondary importance)

Flexible regulations are needed in order to lower the threshold for companies to take back, store and process waste. Currently, companies that take back waste materials are immediately categorised as a "waste treatment company". For that reason alone, companies often do not want to take back any items. A relaxation of the regulations in this field, could encourage some companies to reconsider the take-back and potential reuse/recycling of goods.

1 Inleiding

Het gebruik van vezelversterkte materialen (of composieten) groeit gestaag. Dankzij hun specifieke eigenschappen en nieuwe ontwikkelingen worden zowel thermoplastische als thermohardende composieten meer en meer in diverse toepassingsdomeinen ingezet. Het domein van de vezelversterkte thermoharders is zeer breed en nog volop in expansie.

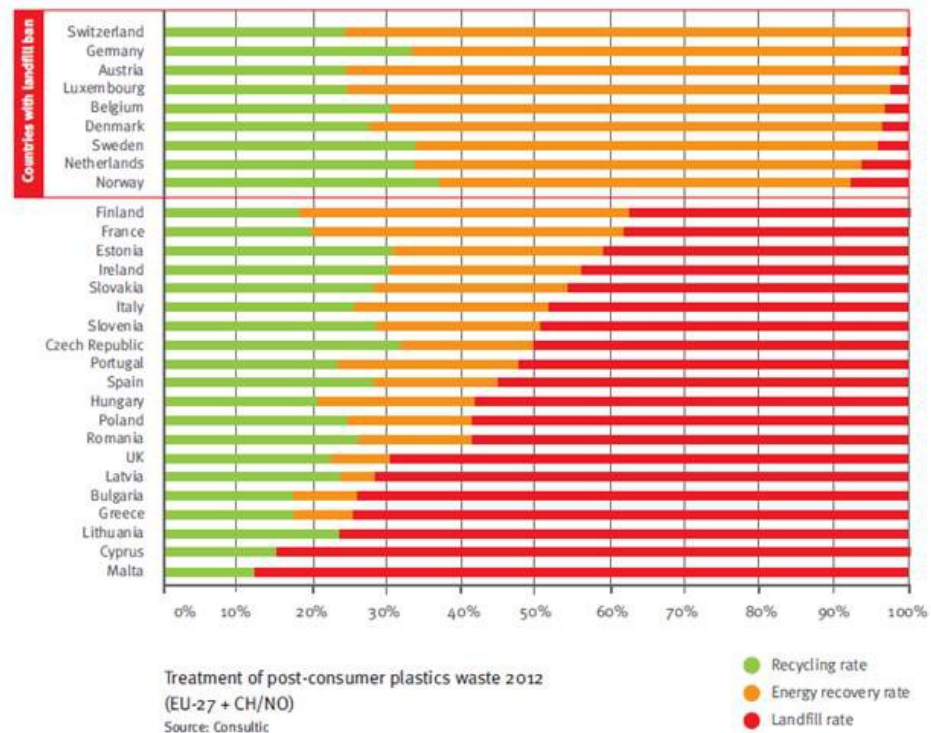
Er zijn vandaag echter weinig hoogwaardige verwerkingsmogelijkheden voorhanden voor de composietmaterialen die einde-leven zijn. Bovendien is er momenteel zeer weinig gestructureerde kennis beschikbaar over de mogelijkheden om recyclaten van composietmaterialen opnieuw in te zetten. De hinderpalen zijn vaak economisch van aard. Zo is de logistiek die nodig is voor inzameling (inclusief transport) en recyclage veelal te duur in vergelijking met de prijs voor primair materiaal. Vooral de lage gewicht/volume-verhouding en het niet beschikbaar zijn van mobiele recyclagesystemen voor composieten verklaren de zeer hoge logistieke kosten. Bovendien is de marktwaarde van de meeste gerecupereerde grondstoffen en recyclaten uit vezelversterkte composieten te laag om een rendabele recyclage mogelijk te maken en is de markt voor gerecycleerd composietmateriaal nauwelijks ontwikkeld. Deze materialen worden in de praktijk momenteel meestal verbrand of gedowncycled.

In de meeste Europese landen is storten de meest courante praktijk voor einde-leven kunststoffen (Figuur 1), waaronder ook einde-leven composieten. Zo werd bijvoorbeeld in het VK in 2008 90% van het composietenafval gestort¹. In 9 Europese landen geldt momenteel een stortverbod voor post-consumer kunststoffen. Door de hoge vulgraad aan niet-brandbare vezels is energetische valorisatie geen haalbare lange termijn optie. De valorisatie van afvalcomposieten in vezels, kunststoffen, brandstoffen en/of specifieke grondstoffen is daarom een belangrijke uitdaging.

Composietproducten dragen vaak bij aan het reduceren van de milieu-impact van producten tijdens hun levensduur, bijvoorbeeld omdat ze lichter zijn dan traditionele materialen en daardoor tijdens transport minder energie vereisen. De grootste milieu-impact van composietproducten zelf situeert zich vaak in de grondstoffen (vezels en matrixmateriaal). Door composietmaterialen hoogwaardig te recyclen, kan het energie-intensieve productieproces van versterkingsvezels omzeild worden. Dit maakt het potentieel voor hergebruik en recyclage vanuit milieuoogpunt des te interessanter (op voorwaarde dat het gebruikte recyclageproces geen buitensporige hoeveelheid energie vereist).

¹ Asokan A. et al. (2008). Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites (2008) Journal of cleaner production 17 (821-829)

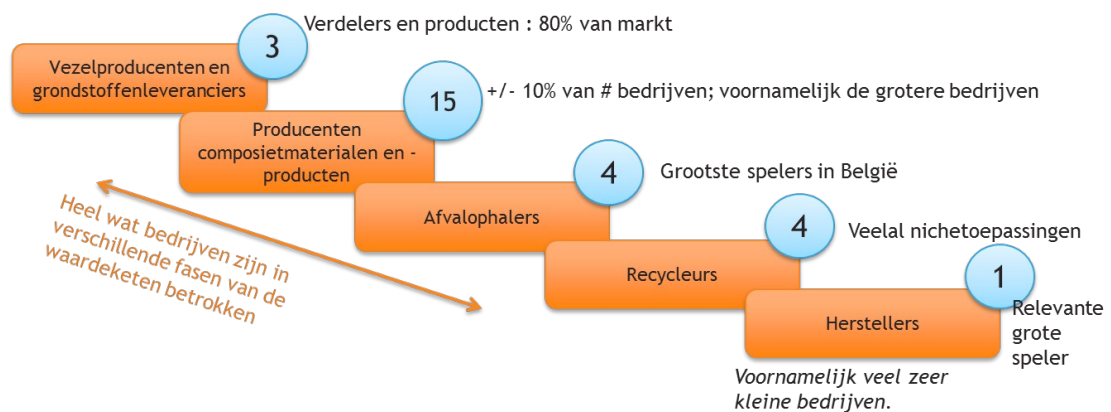
In general, countries with landfill ban achieve higher recycling rates



Figuur 1: EoL verwerking van post-consumer kunststoffen in Europa (2012)

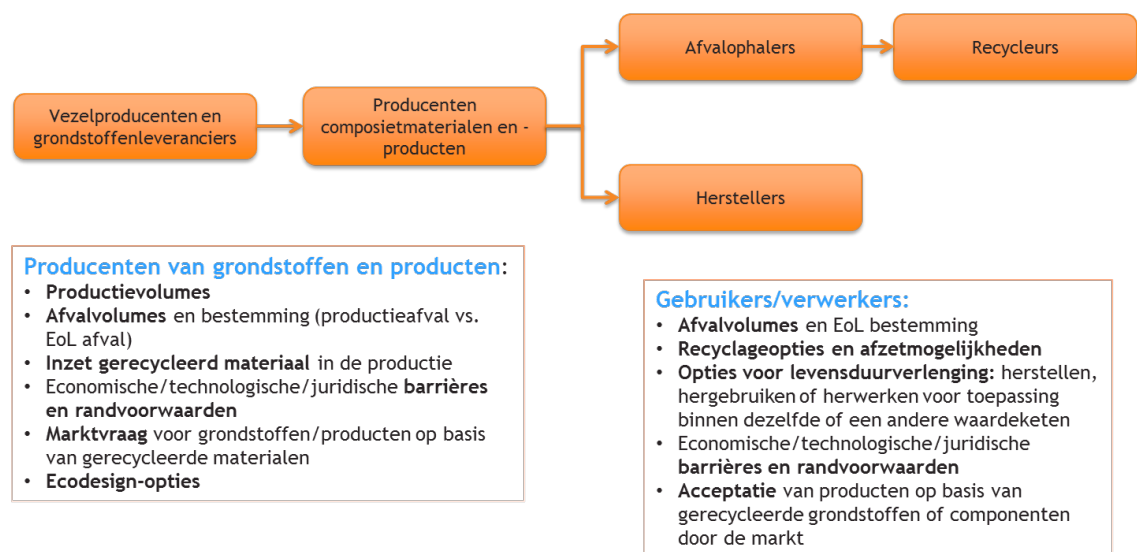
Het doel van deze studie bestaat erin te onderzoeken hoe de materialenkringloop van deze composieten op een hoogwaardige en duurzame manier beter kan worden gesloten door bijvoorbeeld in te zetten op levensduurverlenging (bv. via hergebruik en herstelling), het ontwikkelen van nieuwe recyclagetechnieken en het zoeken van hoogwaardige recyclagetoepassingen. Maar ook op niet-technologisch vlak zijn acties noodzakelijk om kringloopsluiting mogelijk te maken, zoals een betere scheiding en inzameling van afgedankte materialen, duurzaam ontwerp dat hergebruik en recyclage vergemakkelijkt, een meer intensieve samenwerking tussen actoren binnen de waardeketen, faciliterende regelgeving en de versterking van de afzetmarkt voor recyclaten.

Om het potentieel voor (hoogwaardige) recyclage van vezelversterkte thermoharders in Vlaanderen in kaart brengen en na te gaan of het mogelijk is de koploerspositie van Vlaanderen op het gebied van afvalverwerking en materialenbeheer verder te versterken op het vlak van kunststoffen, werd naast literatuuronderzoek eveneens een sectorbevraging uitgevoerd. Uit elke fase in de waardeketen werden enkele representatieve Belgische bedrijven bevroegd (Figuur 2). Daarnaast werden ook de relevante Vlaamse en Europese sectororganisaties gecontacteerd (Agoria, Federplast.be, Febem-Fege, Coberec, Fedustria, EUPC en EUPR). Toonaangevende buitenlandse spelers op vlak van recyclage technologie werden gecontacteerd op de JEC beurs (Parijs, 8-10 maart 2016).



Figuur 2: Sectorbevraging: aantal bevraagde actoren doorheen de keten

De bevraging was specifiek gericht op het verkrijgen van informatie over productieprocessen en afvalstromen, markttrends en toekomstige ontwikkelingen, de interesse vanuit de bedrijven in afvalverwerking en de inzet van recyclaat, barrières en opportuniteiten voor recyclage en hergebruik van materialen en noden op vlak van technologische ontwikkeling, marktontwikkeling en materialenbeleid (Figuur 3).



Figuur 3: Sectorbevraging: inhoudelijk

Aan de hand van de informatie uit deze bevraging werden de gegevens uit de literatuurstudie gevalideerd en aangevuld, en werd een beter beeld geschetst van de heersende trends in de markt, de gevoeligheden en barrières op vlak van hergebruik en recyclage en de mogelijke pistes om vanuit het beleid hierop in te spelen.

Deze studie focust voornamelijk op glasvezelversterkte (Glass Fibre Reinforced Polymers, GFRP) en koolstofvezelversterkte thermoharders (Carbon Fibre Reinforced Polymers, CFRP), aangezien deze vezeltypes het grootste aandeel vertegenwoordigen in de vezelversterkte thermoharders. Meer dan 90% van de thermoharders is gebaseerd op glasvezel, gevolgd door koolstofvezel. De markt van koolstofvezelversterkte materialen is daarenboven een sterke groeiemarkt, waardoor er in de toekomst vermoedelijk meer en meer van deze materialen zullen vrijkomen. Ook de geïdentificeerde hergebruiks- en recyclage-initiatieven zijn gericht op deze

types van composieten. Bovendien is koolstofvezel een (economisch) hoogwaardige vezel, waardoor recyclage economisch interessant kan zijn. Daarnaast hebben de meeste gegevens beschikbaar in marktrapporten en wetenschappelijke publicaties betrekking op GFRP en CRFP.

Voorliggend document schetst een overzicht van de markt van vezelversterkte thermoharders, hun productieprocessen en -volumes, hun eigenschappen, hun toepassingen en hun waardeketen (HOOFDSTUK 2). In HOOFDSTUK 3 wordt de afvalfase besproken en de te verwachten volumes aan afvalstromen die de komende jaren zullen vrijkomen in België en de buurlanden. HOOFDSTUK 4 beschrijft de mogelijkheden op vlak van recyclage, terwijl HOOFDSTUK 5 zich toespitst op initiatieven op vlak van herstelling en hergebruik. In deze hoofdstukken wordt een selectie van voorbeelden genoemd van bedrijven of projecten waarbij composieten hersteld, hergebruikt, herwerkt of gerecycleerd worden. HOOFDSTUK 6 evalueert het potentieel van hoogwaardige recyclage en hergebruik van composietmaterialen in België en lijst de belangrijkste barrières en randvoorwaarden op. Ook wordt ingegaan op de milieu-impact gerelateerd aan composieten en hun end-of-life verwerking. Ten slotte worden in HOOFDSTUK 7 de conclusies van de studie vertaald in een reeks aanbevelingen.

2 Vezelversterkte thermoharders

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we de waardeketen, de toepassingsgebieden en de productie van vezelversterkte thermoharders.

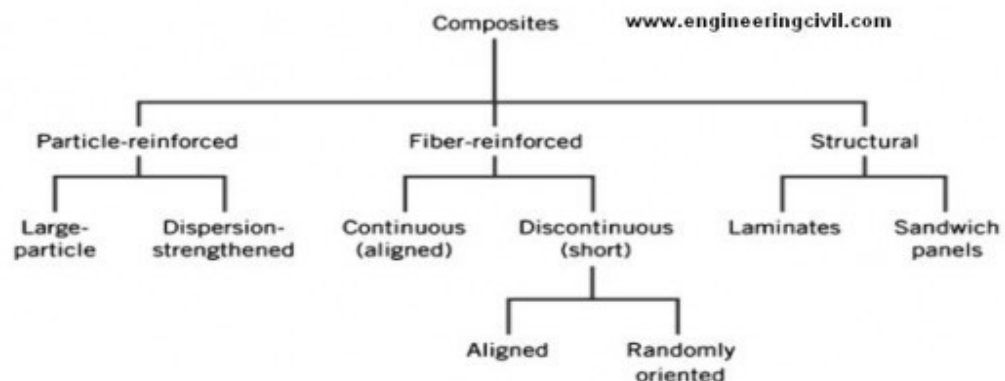
2.1.1 Wat is een composiet?

Een composiet materiaal bestaat uit twee of meerdere materialen die meestal sterk verschillende eigenschappen hebben. Door de combinatie van deze eigenschappen ontstaat een nieuw materiaal (de composiet) met specifieke karakteristieken. De samenstellende materialen blijven echter afzonderlijk bestaan binnen het composiet materiaal, m.a.w. ze lossen niet in elkaar op maar blijven duidelijk van elkaar te onderscheiden. De meeste composieten bestaan uit slechts 2 materialen, waarbij één de matrix vormt en het andere een additief is, vaak een versterkend materiaal. Deze componenten bepalen de eigenschappen in inzetbaarheid van het uiteindelijke materiaal en vormen eveneens een belangrijke factor bij de recyclage. Composieten kunnen eveneens voorkomen als sandwichconstructies, meestal bestaande uit 2 buitenlagen met een kernmateriaal ertussen. Dergelijk relatief dik kernmateriaal, dat de buigstijfheid van de composiet sterk verhoogt, bestaat meestal uit PVC-, PET- of PUR-schuim. Bepaalde composietenonderdelen kunnen ook metalen “inserts” bevatten waarmee de composieten geassembleerd of gemonteerd kunnen worden in grotere constructies. Bepaalde van deze inserts kunnen eventueel ook elektrische of elektronische apparatuur omvatten waarmee bepaalde eigenschappen van de composieten gemonitord kunnen worden.

De meest bekende composieten zijn de vezelversterkte kunststoffen, waarbij de combinatie van vezels met een kunststof matrix leiden tot een materiaal dat sterker is dan kunststof, maar lichter dan traditionele materialen (bv. glasvezelversterkt polyester).

2.1.2 Inleiding op basis van versterkende structuur

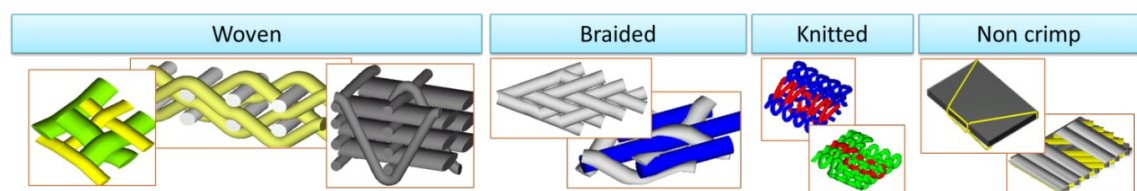
Composietmaterialen kunnen worden ingedeeld op basis van de aard van versterking die werd gebruikt (Figuur 4).



Figuur 4: Classificatie van composieten op basis van hun versterking (Bron: www.engineeringcivil.com)

Een eerste groep binnen de composieten zijn de **partikel versterkte composieten**, bijvoorbeeld spaanplaat, gebonden kurkgranulaat, beton. De partikels (hout, kurk, steen) geven de gewenste materiaaleigenschappen.

De tweede groep zijn de **vezelversterkte composieten**. De vezels die gebruikt worden zijn stijve en sterke vezels zoals glas-, koolstof- (carbon-), aramide- en bepaalde natuurlijke vezels zoals vlas-, hennep- en sisalvezels. De vezels bevatten meestal een "sizing"-laag die de hechting met het matrixmateriaal moet mogelijk maken of verbeteren. Het matrixmateriaal bestaat uit uithardende harsen of thermoplastische polymeren. De matrix kan ook bepaalde additieven bevatten die gebruikt werden als procesadditief, vulstof en/of als functioneel additief zoals brandvertragers, impactverbeteraars, biocides, ... Dankzij de toevoeging van de vezels is het composiet materiaal in vezelrichting sterker en stijver dan het matrixmateriaal op zich. In de praktijk worden de vezels vaak in meerdere richtingen ingewerkt. Vaak worden vezels niet direct ingewerkt, maar eerst omgevormd tot een textiel of vezelmat. Bij een min of meer willekeurige samenpakking van vezels spreekt men van een non-woven. Indien de vezels gebundeld worden tot garen (*yarn*) of garenbundels (*roving*), kunnen ze geweven worden tot een weefsel of woven, waarbij verschillende weefpatronen mogelijk zijn die een grote invloed hebben op de eigenschappen (krimp, drapeerbaarheid en oppervlaktestructuur). Naast geweven kunnen de garens ook gevlochten (*braided*) en gebreid (*knitted*) worden. De garenbundels kunnen ook parallel aan elkaar worden gelegd, waarbij vaak meerdere lagen met verschillende oriëntatie boven op elkaar worden gestikt. In dit geval spreekt men van een non-crimp fabric (*NCF*) (Figuur 5).



Figuur 5: Mogelijke textielvormen voor composieten (Bron: KU Leuven)

Ook is het mogelijk om in de plaats van te vertrekken van afzonderlijke matrix- en vezelmateriaal te werken met voor-geïmpregneerde 'pre-preg'-materialen. Bij deze materialen zijn vezels en matrix al samengevoegd, maar is de matrix nog niet volledig uitgehard waardoor nog vormgeving mogelijk is. Via het doorlopen van een voorgeschreven temperatuur- en drukcyclus wordt het materiaal nadien volledig uitgehard.

Een derde groep bestaat uit (vezelversterkte) **gelaagde structuren**, die ook als sandwichmateriaal kunnen voorkomen als ze een kernmateriaal bevatten (zie hoger).

2.1.3 Indeling op basis van matrixmateriaal

De matrix in een composiet dient als 'lijm' om de vezels of partikels bij elkaar te houden en ervoor te zorgen dat externe spanningen van de ene vezel op de andere kunnen worden overgedragen zodat de belasting verdeeld wordt binnen de composiet. Daarnaast beïnvloedt de matrix de gevoeligheid van het composiet materiaal voor vocht, chemicaliën en UV licht en bepaalt hij fysieke eigenschappen zoals kleur, doorlaatbaarheid voor licht, brandbaarheid en oppervlaktekwaliteit. Op basis van het matrixmateriaal onderscheidt men 2 grote groepen van composieten: de thermoplasten en de thermoharders.

Thermoplasten zijn kunststoffen die bij verhitting verweken en vervormen en bij afkoeling weer een vaste vorm aannemen. Over het algemeen hebben thermoplasten door hun hoge viscositeit een hoge verwerkingstemperatuur en -druk nodig om de vezels te impregneren en composieten te vervaardigen.

Thermoharders zijn kunststoffen die niet verweken bij verhitting. De meest voorkomende thermoharders in composieten zijn polyesters (voer- en vaartuigen, tanks en leidingen), vinylesters (apparatuur in chemische of corrosieve omgevingen, zoals procestanks, opslagvaten, leidingen, rooktorens) en epoxyharsen (windturbinebladen).

2.2 Productie van vezelversterkte thermoharders

Tijdens het productieproces dient de vezel met de kunststof in de juiste verhouding gemengd en uitgehard te worden. Om de gewenste geometrie te verkrijgen wordt er met mallen gewerkt. Het gekozen productieproces van de composiet is dan ook sterk bepalend voor de kwaliteit van het eindproduct.

2.2.1 Productieprocessen

De productieprocessen voor de aanmaak van thermoharders worden ingedeeld op basis van de vezellengte en de maltechniek (Tabel 1, Figuur 6).

	Lange vezels (< 5 cm)	Continue vezels
Open mal	Spray-up (A) Hand lay-up (B)	Wikkelen (C) Pultrusie (D) Hand lay-up (B)
Gesloten mal	Vacuüminfusie (E) RTM-light (C) BMC/SMC (I)	Vacuüminfusie (E) RTM-light / RTM (F) Autoclave processing (G) Out-of-autoclave processing (H)

Tabel 1: Productieprocessen voor thermoharders

A. Spray-up (vezelspuiten)

Een vezelbundel wordt door een speciaal spuitpistool gehaald. De vezelbundel wordt hierdoor in stukjes gekapt en samen met hars op een mal gespoten. De vezelrichting is hierdoor min of meer willekeurig, de dikte wordt bepaald door de duur van het bespuiten. Deze techniek wordt voornamelijk gebruikt voor de aanmaak van grote voorwerpen of voor het coaten van constructies.

B. Hand lay-up (hand lamineren)

Vezels (lange of korte) worden in een mal gelegd en manueel ingestreken met hars. Dit proces is goedkoop (eenvoudige werktuigen), maar zeer arbeidsintensief.

C. Winding (wikkelen)

Eén of meerdere lange vezelbundels worden door een harsbad geleid en rond een draaiende mal gewikkeld. Dit proces is zeer geschikt om cilindrische vaten (bv. reactorvaten of drukvaten) te maken.

D. Pultrusie

Deze techniek wordt veel gebruikt voor de productie van profielen en is gebaseerd op (semi-)continue extrusie in een pultrusie machine. Omdat het moeilijk is om vezelversterkte materialen doorheen een mal te persen, wordt bij pultrusie getrokken ('pull') i.p.v. geduwd. Eén of meerdere lange vezelbundels of vezelmatten worden eerst door een harsbad geleid en

vervolgens doorheen de mal getrokken. Het resulterende profiel wordt verder in de productielijn uitgehard en nadien op een bepaalde lengte afgezaagd.

E. Vacuüminfusie

Via het aanleggen van een vacuüm druk wordt het hars in een laminaat gezogen. Zie 'F'.

F. (Vacuum-Assisted) (Light) Resin Transfer Moulding ((VA)RTM-light/(VA)RTM)

Vezels (kort of lang, en al-dan-niet in weefselvorm) worden in een mal geplaatst samen met hulpmaterialen voor het verbeteren van de harsstroom. Het geheel wordt vacuüm getrokken doormiddel van een vacuümfolie, een tegenmal in composietmateriaal of een tegenmal in staal voor respectievelijk vacuüminfusie, RTM-light of RTM. Door het drukverschil met atmosferedruk worden de vezels en hulpmaterialen geïmpregneerd met het hars. Deze techniek laat toe om vrij grote objecten te maken in vrij grote series.

G. Autoclave processing

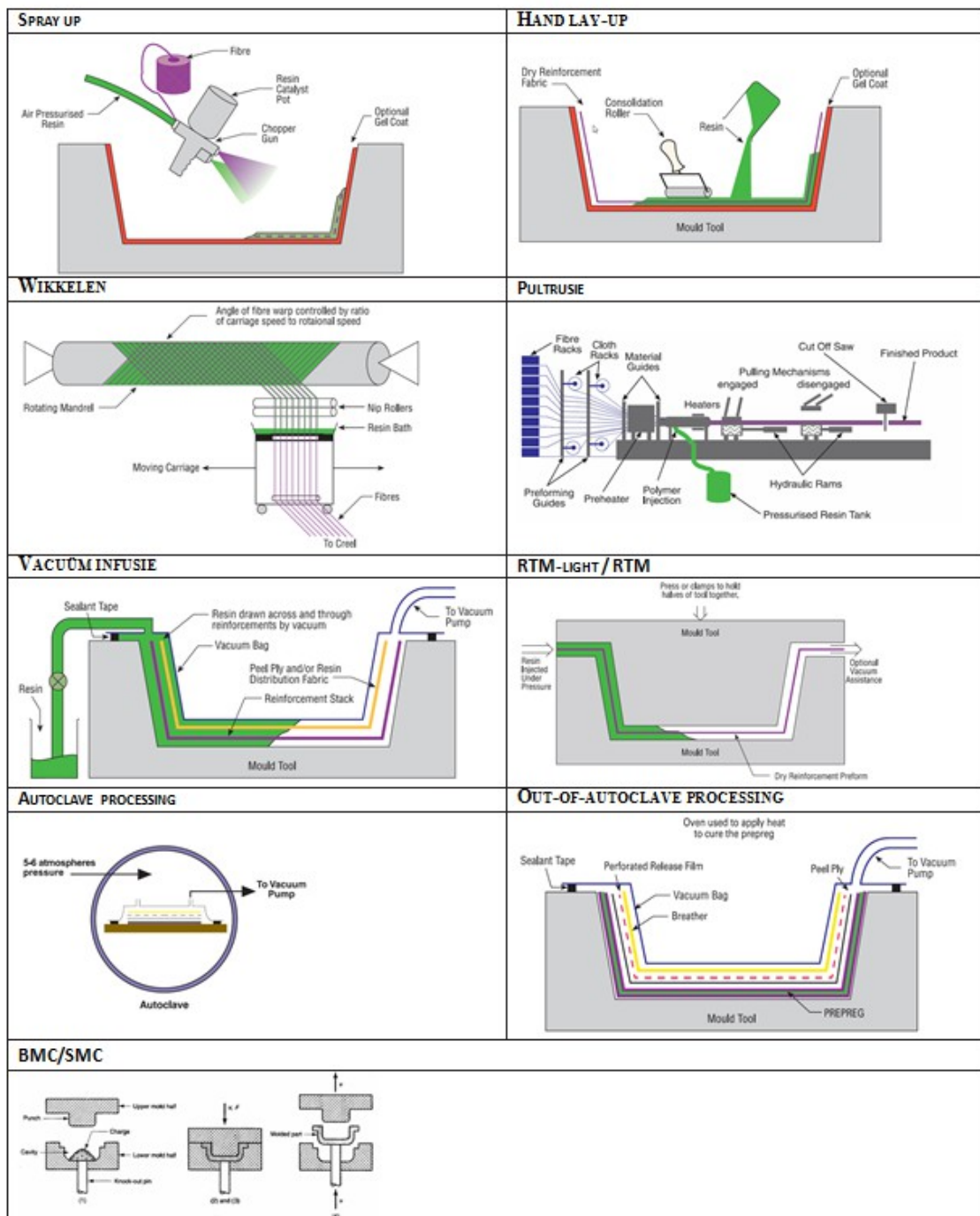
Geïmpregneerde vezels (prepreg) worden in een mal geplaatst, samen met hulpmaterialen voor het verspreiden van vacuüm. Een vacuümfolie wordt over dit geheel geplaatst. De hele mal wordt in een autoclaaf geplaatst. Bij gebruik van een autoclaaf kan een hogere druk dan atmosferedruk worden opgelegd. De druk wordt opgevoerd tot typisch 5 à 8 bar, de temperatuur tot typisch 90 à 150°C. De autoclaaftechniek is vrij duur en beperkt onderdelen die in de autoclaaf passen. Deze techniek wordt vaak gebruikt voor de productie van vliegtuigonderdelen.

H. Out-of-autoclave processing (OOA)

Gelijkaardig aan autoclave processing, maar er wordt een oven gebruikt in plaats van een autoclaaf.

I. Bulk Moulding Compounds en Sheet Moulding Compounds (BMC/SMC)

Korte vezels worden gemengd met een hars, zodanig dat een compound wordt gecreëerd. Deze compound wordt in een verwarmde dubbele mal geperst tot het gewenste onderdeel. Deze techniek laat serieproductie toe.



Figuur 6: Thermohardende productieprocessen (bron: Gurit – Guide to composites (www.gurit.com) en mechanicalinfo.wordpress.com)

Na de productie van de onderdelen in de mal is vaak een nabewerking van de randen nodig, bv. schuren en polijsten. Schilderen wordt vaak vermeden door pigment bij het hars te mengen of door tijdens de productie een gekleurde coating in de mal aan te brengen.

Process	Fibers			Matrix	Cycle time
	Material	Architecture	Volume %		
Spray-up	glass	chopped fiber	20-30 %	Polyester	some hours
Hand layup	glass	mats of weaves	20-40 %	Polyester, vinylester, epoxy	some hours
Prepreg layup, evt. autoclave	glass, carbon, aramid	UD fibers or weaves	40-70 %	Epoxy, thermoplastics	1 day
RTM-light, VARI, ...	glass	Mats, weaves, NCF	<40 % NCF 55 %	Polyester, vinylester, epoxy	some hours
Low pressure injection: RTM and VARTM	glass	Mats, weaves, NCF	<60 %	Polyester	30 min
Low pressure injection: RTM and VARTM	glass, carbon	Weaves, NCF, braids	<60 %	Epoxy	30 min
SMC, DMC press	glass	Crisscross premix	in 20-30 %	Polyester	2-3 min
High pressure injection: BMC	glass	crisscross, premix	in 10-20 %	Polyester, phenol	2 min
Reaction injection: SRIM	glass	mat	<40 %	PU	1-2 min
Profiles or long objects					
Pultrusion	glass, carbon	roving mats	20-65 %	polyester, vinylester	0.5-2 m/min
Revolution bodies (cylinders, drums, ...)					
Filament winding	Glass, carbon	roving	50-60 %	polyester, vinylester, epoxy, thermoplast	1h - several days
Centrifugal casting	glass	chopped fibers	<40 %	polyester	some hours

Tabel 2: Overzicht van productieprocessen in relatie tot gebruikte vezels en matrixmaterialen

2.2.2 Eigenschappen

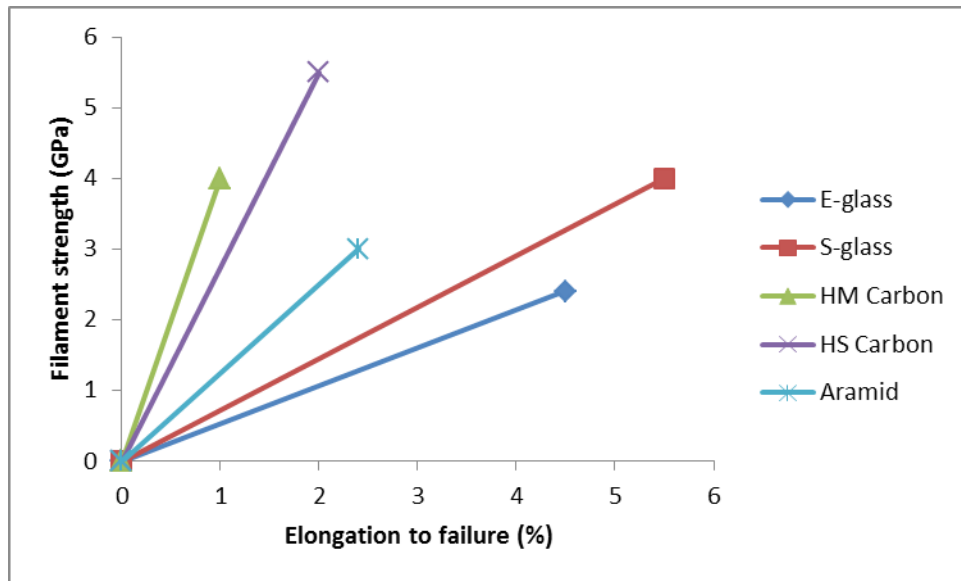
Eigenschappen van vezelversterkte thermoharders zijn voornamelijk afhankelijk van het vezeltype en de vezelfractie (de vezelvolumefractie V_f) (Figuur 7).

Er zijn verschillende types van glasvezel met andere eigenschappen. Voor de versterking van composietmaterialen wordt voornamelijk E-glas gebruikt (glas uit aluminium-calcium borosilicaten, met hoge sterkte en elektrische weerstand), maar ook AR-glas (glas op basis van zirconium silicaten) en S-glas (glas met hoge sterkte en stijfheid en hoge weerstand tegen

temperatuur en corrosie, op basis van magnesium aluminosilicaten) worden voor deze toepassing gebruikt².

Koolstofvezels worden meestal ingedeeld volgens hun modulus, waarbij meestal een onderscheid wordt gemaakt tussen HS (high strength), IM (intermediate modulus), HM (high modulus en UHM (ultra high modulus)³.

Tabel 3 illustreert dat de V_f samenhangt met bepaalde vezelarchitecturen en productieprocessen. Eigenschappen variëren van eigenschappen net iets hoger dan het onge vuld hars (bij V_f 20%, random georiënteerde korte vezels) tot eigenschappen van metalen.



Figuur 7: Eigenschappen van vezelversterkte thermoharders (Bron: Management, recycling and reuse of waste composites, 2010)

Proces	Materiaal	Vezel	V_f (%)	Modulus (GPa)	Sterkte (MPa)
Injectie	BMC	Glas	20	13	31
Compression Moulding	SMC	Glas	30	11	80
Hand Lay-up	Polyester	Glas	40	20	320
RTM	Epoxy	Glas	55	22	360
VARTM	Epoxy	Glas	55	24	550
VARTM (UD)	Epoxy	Carbon	55	130	1200
Prepreg	Epoxy	Carbon	50	60	890

Tabel 3: Invloed van vezeltype en vezelfractie op de eigenschappen van de het composietmateriaal (Bron: Management, recycling and reuse of waste composites, 2010)

2.3 Toepassingsgebieden

Vezelversterkte thermoharders worden in een breed scala van toepassingen gebruikt. Vooral het lichte gewicht en de hoge sterkte zijn sterke argumenten om composietmaterialen te gebruiken. De toepassing van thermoplastische composieten kent een grotere procentuele groei maar blijft t.o.v. van de thermohardende composieten vrij bescheiden.

² <http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html#sthash.gyjXoWyA.dpbs>

³ <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/reinforcements/carbon-fibrefiber/>

Enkele belangrijke troeven van composietmaterialen zijn de volgende:

- Hoge stijfheid en sterkte: composieten worden veelal gebruikt omwille van hun hoge stijfheid en sterkte. Door verschillende ontwerpvrijheden zoals vezeltype, vezelfractie, laagdikte en vezelrichting kunnen onderdelen erg materiaalefficiënt worden opgebouwd;
- Lichtgewicht: composieten hebben hogere specifieke eigenschappen in vergelijking met de meeste materialen die in deze toepassingen worden gebruikt.
- Corrosieweerstand: composieten roesten of corroderen niet. Er zijn verschillende additieven en vulstoffen beschikbaar om een lange levensduur te garanderen.
- Ontwerpvrijheid: composietonderdelen kunnen vrijwel in eender welke vorm geproduceerd worden. De onderdelen mogen complex, klein of groot, structureel of decoratief, of een combinatie van voorgaande zijn.
- Vereenvoudigde assemblage: de vrijheid in het ontwerp en de productie van composietonderdelen zorgen ervoor dat verschillende elementen uit een klassieke productiemethode kunnen geïntegreerd worden in één element.

2.3.1 Industriële producten

Composieten worden veel gebruikt in de **transport** industrie, bijvoorbeeld voor de opbouw van de carrosserie en de productie van scheepsrompen (Figuur 8). Hier komen verschillende van de voordelen van composietmaterialen tot hun recht, zoals de vereenvoudigde assemblage doordat er minder, maar grotere onderdelen geassembleerd worden, de corrosieweerstand en de gewichtsreductie door de hoge sterkte. Door het lagere eindgewicht is ook het brandstofverbruik van de voertuigen lager.

Ook voor **silo's en opslagtanks** worden thermohardende composieten gebruikt. De productie van tanks gebeurt vaak via de wikkeltechniek (zie 2.2.1) met vezels, of met matten (Figuur 8).



Figuur 8: Toepassingen van composietmaterialen in industriële producten: (a) scheepsrompen (hand lay-up matten), (b) opslagtanks (wikkeltechniek-matten), (c) opslagtanks (wikkeltechniek)

2.3.2 Bouwsector

Composietmaterialen worden ingezet in allerlei constructie-elementen (profielen, gevelbekleding, interieur elementen) of voor de productie van voorgevormde zwembaden (Figuur 9).



Figuur 9: Toepassingen van composietmaterialen in de bouw: (a) constructie-elementen (pultrusie), (b) voorgevormde zwembaden (hand lay-up matten) (c) profielen (pultrusie)

2.3.3 Publieke sector

Voor openbare werken en wegenwerken worden soms partikel versterkte composieten ingezet, dankzij hun compressiesterke en weersbestendigheid (corrosie, UV-licht, water, enz.), bijvoorbeeld in straatmeubilair, kabelgoten, inbouwputten voor waterleidingen en -putten, verkeersdrempels, anti-parkeerdrempels, enzovoort (Figuur 10).



Figuur 10: Toepassing van composietmaterialen in de publieke sector: (a) straatmeubilair (intrusie – korte vezels), (b) inbouwputten (recyclaat korte vezels) (c) SMC Composiet bank

2.3.4 Consumentengoederen

In het domein van de consumentengoederen zijn composietmaterialen vooral terug te vinden in sportmateriaal (fietsen, rackets, golf, watersport (boten, surfplanken, kajaks,...)), dankzij hun licht gewicht en grote sterkte (Figuur 11). Ook voor design (meubelen, verlichting, ...) worden composieten ingezet dankzij hun grote ontwerpvrijheid.



Figuur 11: Toepassingen van composietmaterialen in consumentengoederen: sportmateriaal (RTM technologie)

2.3.5 Energie sector

Voornamelijk in de windenergie wordt composiet gebruikt in de bladen van windmolens. Aangezien windmolenbladen steeds langer worden, zijn naast glasvezels ook koolstofvezels veel besproken versterkingsvezels voor dit soort toepassingen. In isolatoren en behuizingen komen minder structurele composieten aan bod, typisch met kortere vezels in processen met kortere cyclustijden.

Andere toepassingen in de energiesector zijn behuizingen voor binnen- en buitentoepassingen (bv. elektriciteitskasten) en producten waarbij de elektrische isolatie belangrijk is (Figuur 12).



Figuur 12: Toepassingen van composietmaterialen in de energiesector

2.3.6 Automobiel- en transportsector

In de automobiel industrie worden steeds meer composieten gebruikt omwille van hun licht gewicht, nl. in bijna alle autotypes en voor vele doelgroepen (Figuur 13).



Figuur 13: Toepassing van koolstofvezel in sportwagens, onderdelen als dakpanelen in composiet, carrosserie in biogebaseerde materialen in racewagen, chassis en structuurelementen in elektrische wagens

Ook in het vrachtverkeer wordt veel composiet gebruikt in carrosserieën en panelen van vrachtwagens, brandweerwagens, enz (Figuur 14).



Figuur 14: Toepassing van glasvezelversterkte panelen in vrachtwagens en brandweerwagens

2.3.7 Elektronica sector

Printplaten zijn vervaardigd uit glasvezelversterkt composietmateriaal, voornamelijk voor zijn isolerende eigenschappen en zijn mechanische eigenschappen (hoge stijfheid, ook bij hogere temperatuur – bij solderen) (Figuur 15).



Figuur 15: Toepassing van glasvezelversterkte composieten als dragermateriaal in elektronische printplaten

2.4 Marktspelers in België en Vlaanderen

Het aantal **productiebedrijven** van vezelversterkte thermoharders in Vlaanderen wordt geschat op 200, waarvan meer dan 90% KMO (Tabel 4). De meeste bedrijven leveren maatwerk producten en produceren op ambachtelijke wijze. Ca. 20% van de bedrijven werkt op basis van geautomatiseerde productielijnen.

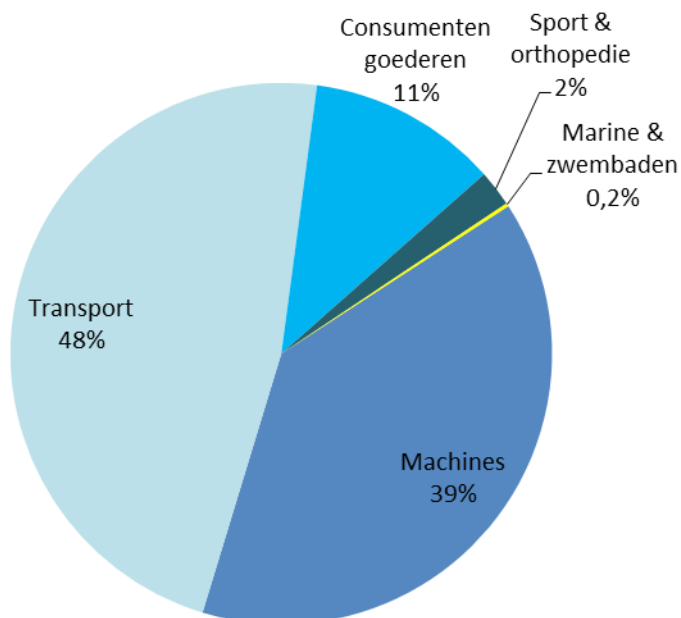
Productsegment	Aantal bedrijven	Personeel	Omzet
Thermohardende composieten			
Geavanceerde producten	40 (90% KMO)	1300	M€ 59
Ambachtelijke producten	150 (99% KMO)	270	M€ 9
Grondstoffen/halffabricaten leveranciers	25		

Tabel 4: Aantal Vlaamse producenten van thermohardende composieten per productiemethode (Inschatting van Sirris, 2015)

Het aantal bedrijven in Vlaanderen dat potentieel **composietmaterialen zou kunnen gebruiken** ligt rond de 890, waarvan eveneens meer dan 90% KMO is. Hierbij kunnen we aannemen dat in de marktsegmenten machines, transport, sport en marine het bijna volledig gaat om thermohardende composieten, terwijl de verdeling tussen thermohardende en thermoplastische materialen in het segment consumentengoederen vermoedelijk gelijkmatig verdeeld is (Tabel 5, Figuur 16).

Marktsegment	Aantal bedrijven
Machines, (industrieel & medisch)	400 (75% KMO)
Transport	128 (80% KMO)
Consumenten goederen	172 (85% KMO)
Sport & orthopedie	126 (100% KMO)
Marine & zwembaden	10 (100% KMO)
Bouw	30 (60% KMO)
Luchtvaart & defensie	20 (60% KMO)

Tabel 5: Vlaamse bedrijven die vezelversterkte kunststoffen gebruiken, per marktsegment (Inschatting van Sirris op basis van NACE codes, 2015)



Figuur 16: Belangrijkste toepassingen van vezelversterkte thermoharders in Vlaanderen - omzetcijfers

2.5 Productievolumes en marktprijzen

De globale markt voor composieten vertegenwoordigt meer dan 8 miljoen ton aan materialen, waarbij het merendeel (> 70%) thermoharder gebaseerd is, de rest is op basis van thermoplasten. De markt van vezelversterkte composieten groeit wereldwijd 12% per jaar.

Cijfers over productievolumes van composieten in de wereld, Europa en Vlaanderen zijn zeer verspreid over verschillende studies en rapporten en variëren vaak sterk naargelang de gehanteerde bron. Dit is deels te wijten aan het ontbreken van een centrale manier om deze volumes te rapporteren en bij te houden op het detailniveau van composietkunststoffen. De gerapporteerde hoeveelheden zijn meestal inschattingen. Een andere reden voor de sterke variatie is de verscheidenheid aan composietmaterialen, waardoor het niet steeds duidelijk is op welke composietmaterialen een bepaald cijfer precies doelt. Gaat het enkel om thermoharders, om thermoplasten of om beide? Gaat het enkel om glasvezelversterkte materialen, of zijn ook andere vezels mee opgenomen? Gaat het om volledige composietmaterialen of enkel om de vezels? Om welk jaar gaat het?

In onderstaande paragrafen worden enkele volume-inschattingen vanuit verschillende bronnen weergegeven. Zoals aangegeven zijn de cijfers niet volledig consistent met elkaar en is de reden voor de verschillen niet altijd duidelijk.

2.5.1 Op basis van versterkingsvezels

— *Glasvezel*

Op gebied van vezelversterking wordt de markt gedomineerd door glasvezel (84%⁴ - 90%⁵). De totale wereldmarkt in 2014 omvatte 8.800.000 ton **glasvezelversterkte kunststoffen**. Binnen Europa gaat het om ca. 2,3 miljoen ton, waarvan 1,04 miljoen ton thermoharder gebaseerd is en 1,25 miljoen ton kortvezelige thermoplast. Afnemers bevinden zich voornamelijk in de transportsector en de bouwindustrie (Figuur 17). Hoewel de productievolumes binnen Europa in absolute termen licht stijgt, neemt het relatieve belang van de Europese productie in vergelijking met de wereldproductie af. De laatste jaren is een verschuiving merkbaar naar Azië (BRIC landen) en Amerika, vooral wat betreft standaard producten (commodity's)⁶.

4 JRC, 2013. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/27470/1/lbna25719enn.pdf>

5 Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composites Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014 - 2020

6 AVK Composite Market Report 2015

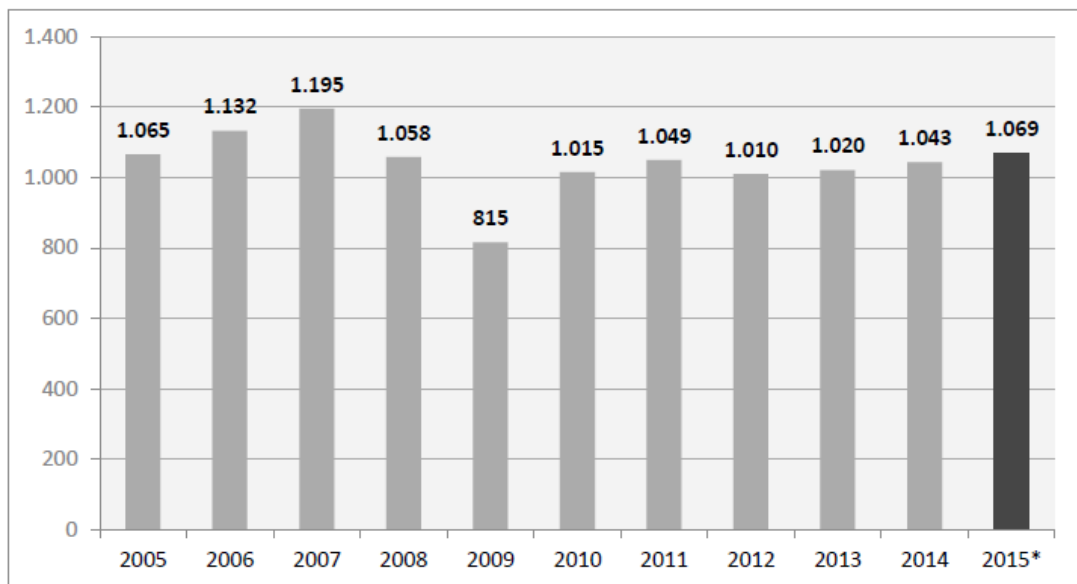


Fig. 1: GRP production volume in Europe since 2005 (in kilotonnes)
(2015* = estimated figure)

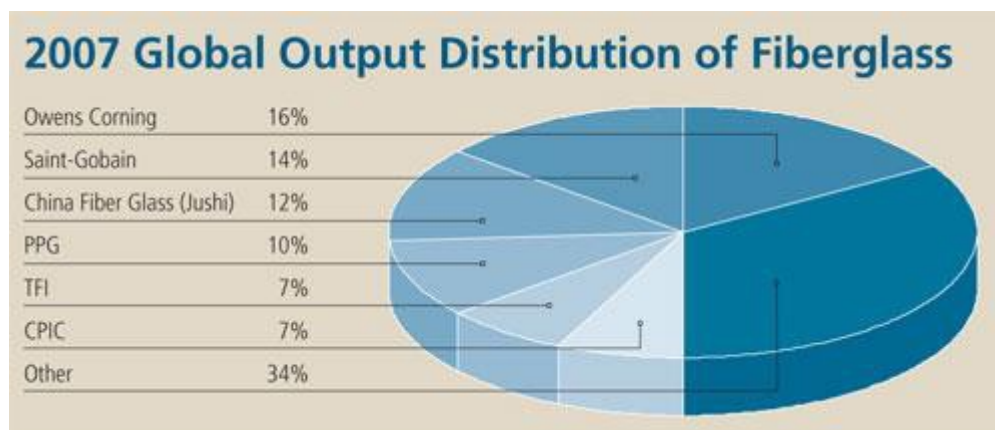
Figuur 17: Productie van glasvezelversterkte composieten in Europa (AVK Composites market report 2015)

Binnen Europa is Duitsland de belangrijkste producent van glasvezelversterkte composieten, met een totaal productievolume van 200 kton in 2014. Voor de Benelux hanteert AVK (Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe) een totaal productiecijfer van 43 kton in 2014⁷. Op basis van de uitgevoerde sectorbevraging kan worden ingeschat dat het aandeel Belgische productie aan glasvezelversterkte composieten ca. 20 kton per jaar bedraagt. Er zit echter een grote onzekerheid op dit cijfer door de beperkte transparantie van de sector en het gebrek aan concrete data. Wel kan gesteld worden dat ca. 90% van de Belgische composietproductie bestemd is voor export.

60% van alle glasvezels voor composieten worden aangeleverd door 5 grote glasvezel-producenten. De overige 40% van de glasvezelmarkt is verdeeld over een 50-tal kleinere leveranciers (Figuur 18). Wereldwijd zijn de grootste producenten van glasvezel en GFRP gelegen in Zuidoost Azië en in Noord Amerika (> 50% van de wereldproductie). Enkele grote producenten die actief zijn in de wereldmarkt van GFRP zijn Johns Manville, BGF Industries, Asahi Glass Company Limited, Advanced Glassfiber Yarns LLC, Chomarat Group, Jushi Group Co. Ltd., Taishan Fiberglass Inc., Owens Corning, PPG Industries Inc., Binani 3B-The Fibreglass Company, Saertex Group, Chongqing Polycomp International Corp., Saint-Gobain Vetrotex, Nitto Boseki Co. Ltd. en Nippon Sheet Glass Co. Ltd⁸.

⁷ AVK Composite Market Report 2015

⁸ Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composites Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014 - 2020



Figuur 18: Productie van glasvezel wereldwijd (bron: VKC)

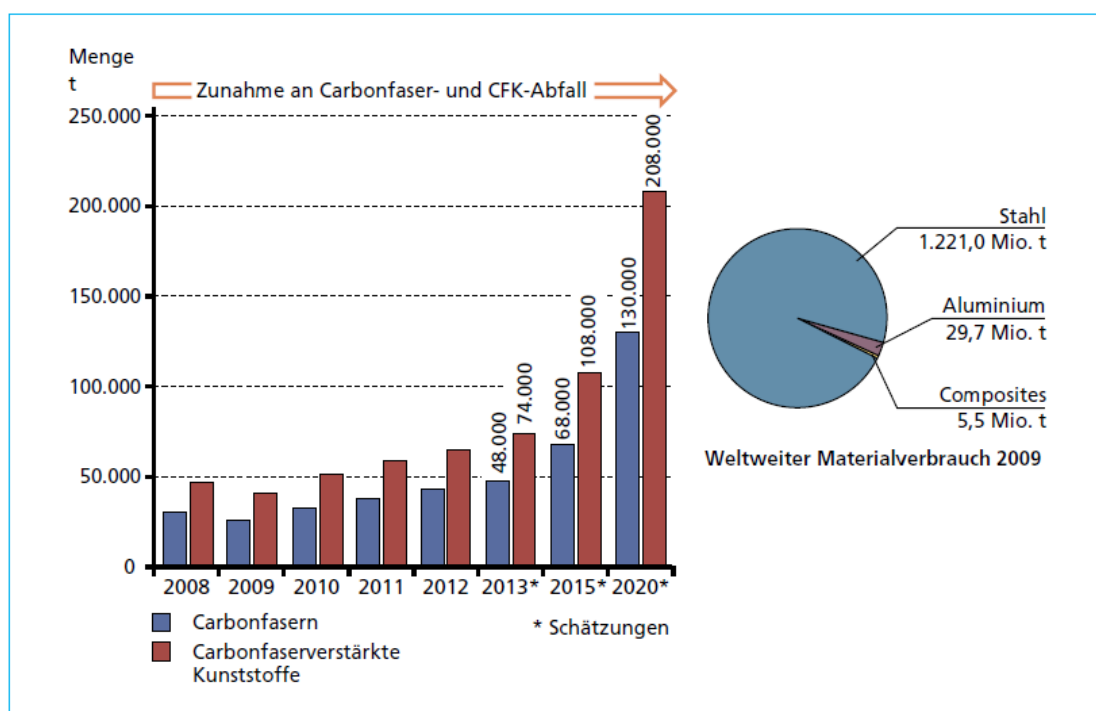
In de komende 5 jaar wordt vooral in de groei landen, zoals China en India, een stijgende vraag naar GFRP verwacht voor bouwtoepassingen en de opbouw van infrastructuur. In Noord Amerika wordt de marktvraag vooral gedreven door de bouw, automobielsector, lucht- en ruimtevaart, windenergie en militaire toepassingen in de VS⁹.

— **Koolstofvezel**

In 2014 werd wereldwijd ca. 125.000 ton **koolstofvezelversterkte composieten** geproduceerd (waarbij 53.000 ton koolstofvezel gebruikt werd). 31% hiervan werd geproduceerd in de VS (en Mexico), gevolgd door 20% in Japan en 17% in China (en Taiwan). Ongeveer 19% werd geproduceerd in Europa (Hongarije, Duitsland, Frankrijk en het VK). Ca. 35% van de wereldproductie (36.800 ton) is bestemd voor de Europese markt. Tegen 2021 wordt verwacht dat de wereldwijde vraag naar koolstofvezels zal stijgen boven de 100.000 ton, en naar volledige composieten naar meer dan 200.000 ton, in het bijzonder een sterke stijging binnen de automobiel toepassingen¹⁰ (Figuur 19).

⁹ Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composites Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014 - 2020

¹⁰ AVK, 2015. Composites Market Report



Figuur 19: Wereldmarkt voor koolstofvezelversterkte kunststoffen

(http://www.vivis.de/phocadownload/2014_rur/2014_RuR_371_378_Meiners.pdf)

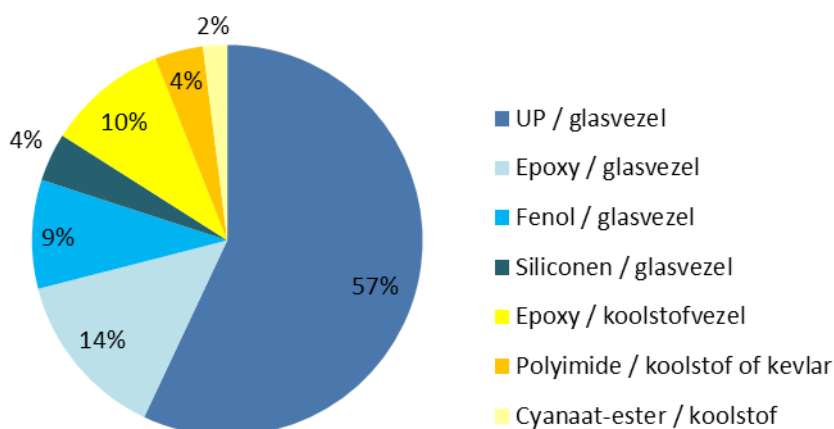
— **Natuurlijke vezels**

Voor natuurlijke vezels zijn geen recente marktcijfers beschikbaar. In 2012 werden in de EU 92.000 ton composieten op basis van natuurlijke vezels geproduceerd, vooral voor toepassing in de automobielen sector met Duitsland als grootste speler¹¹.

Figuur 20 geeft het relatief belang weer van verschillende hars-vezelcombinaties die ingezet worden voor de productie van vezelversterkte composieten (zowel glas als koolstof). De markt voor koolstofvezels maakt in deze cijfers 13% uit, wat zeer hoog lijkt in vergelijking andere bronnen. In ieder geval groeit de markt van de koolstofvezels zeer sterk. Aramide, beter bekend onder de merknaam Kevlar, en natuurlijke vezels worden eerder gebruikt in nichetoepassingen.

¹¹ AVK Composites Market Report 2015

Meest voorkomende combinaties hars / vezel



Figuur 20: Relatief belang van de meest voorkomende vezel-harscombinaties (wereldwijd)
(bron: VKC)

De gangbare kost- en verkoopprijzen van glasvezels varieert. E-glasvezels kosten 1,2-2,2 €/kg, terwijl S-glasvezels duurder zijn, namelijk 9-15 €/kg (zie 2.2.2 voor de verduidelijking van het verschil tussen beide). Koolstofvezels zijn het meest hoogwaardig met een kostprijs van 18-65 €/kg (ca. 10 keer de waarde van glasvezels).

2.5.2 Op basis van matrixmateriaal

Polyester is het dominante thermohardende matrixmateriaal. Andere veel gebruikte matrixtypes voor thermoharders zijn vinylester, epoxy en fenolharsen. Binnen elke harstype bestaan er meerdere grades waardoor de prijzen binnen een zelfde harstype sterk uit elkaar kunnen liggen. Tabel 6 geeft enkele richtprijzen voor typische matrixmaterialen.

Harstype	Prijs in euro/kg
UP (onverzadigd polyester)	1,2 à 2,8
Vinylester	2,8 à 5,5
Epoxy	4 à 21
Fenol	1,7 à 5,4
Cyanaat-ester	55
PU (polyurethaan)	2,7 à 11
BMI (Bismaleimide)	> 67
Polyimide	> 110

Tabel 6: Prijzen van harsmaterialen (JRC, 2013)

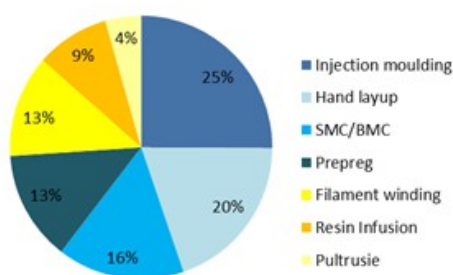
2.5.3 Op basis van productieproces

De productie van composietmaterialen is een zeer heterogene sector, waarbij de toegepaste productieprocessen even belangrijk zijn als de materialen en de toepassingsgebieden. Tabel 7 en Figuur 21 geven aan welke productieprocessen het meest worden toegepast **wereldwijd** en hoe de prijs voor composieten varieert al naargelang de productiemethode. De verschillen in kiloprijs zijn voornamelijk te wijten aan verschillen in arbeidskosten.

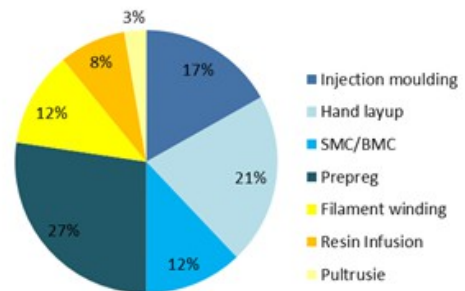
Proces / Product	Volume (kiloton)	Omzet (miljoen euro)	Gem. kiloprijs in euro
Injection moulding	1164	5159	4,4
Hand layup	912	6436	7,1
SMC/BMC	727	3704	5,1
Prepreg	627	8357	13,3
Filament winding	582	3593	6,2
Resin Infusion	421	2510	6
Pultrusie	205	825	4
TOTAAL	4.638	30.584	

Tabel 7: Wereldwijde productievolumes en prijzen van glasvezelversterkte composieten op basis van productietechniek (JRC, 2013)

Belangrijkste productieprocessen - volume (wereldwijd)



Belangrijkste productieprocessen - omzet (wereldwijd)

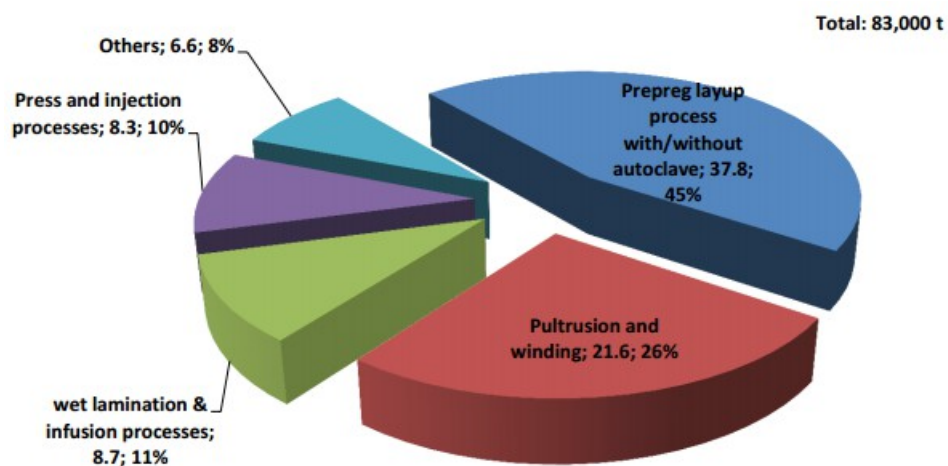


Figuur 21: Belangrijkste productieprocessen voor glasvezelversterkte composieten (JRC, 2013)

Van de **glasvezelversterkte composieten** die in Europa worden geproduceerd, gebeurt dit voor 25% (264 kton) via SMC/BMC. SMC/BMC laat serieproductie toe en technologieën voor massaproductie zijn matuur en worden al sinds jaren als standaard productietechnieken beschouwd. SMC/BMC wordt vooral (45%) gebruikt in elektrische en elektronische apparaten en installaties en in de automobiel industrie (40%). Open maltechnologie (hand layup en sprayup) vertegenwoordigt 23% van de composieten. De techniek is zeer geschikt voor de productie van grote objecten en voor componenten in lage oplages (zwembaden, bootrompen, windmolenbladen, enz.). Gesloten maltechnologie (RTM) is een groeiende sector (13% per jaar) en vertegenwoordigt in Europa 10% van de totale markt, met een breed scala aan toepassingen in allerlei sectoren. Continue processen (zoals pultrusie en productie van panelen) vertegenwoordigen eveneens 10%, in het bijzonder in bouwtoepassingen. Technieken voor de productie van tanks en leidingen (wikkelen, centrifugale processen) vertegenwoordigen 11% van de markt¹². Een aantal producten combineren verschillende technologieën: een typisch voorbeeld zijn de tanks en silo's waarbij gebruik gemaakt wordt van filament winding voor de romp en sprayup voor de bodems.

Koolstofvezelversterkte composieten worden voor 45% geproduceerd via lay-up processen met prepreg's. Pultrusie en wikkelen zijn goed voor 26% van de productie (Figuur 22).

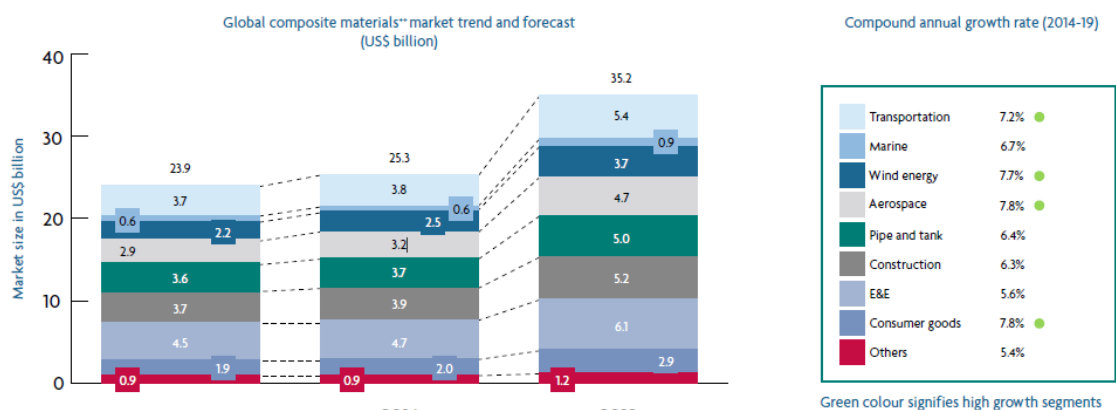
¹² AVK, 2015. Market Report 2015



Figuur 22: Productieprocessen voor koolstofvezelversterkte composieten (in kton, 2014)
(bron: AVK, 2015)

2.5.4 Op basis van toepassing

Figuur 23 geeft de verwachte marktevolutie weer voor de verschillende toepassingen tot 2019.



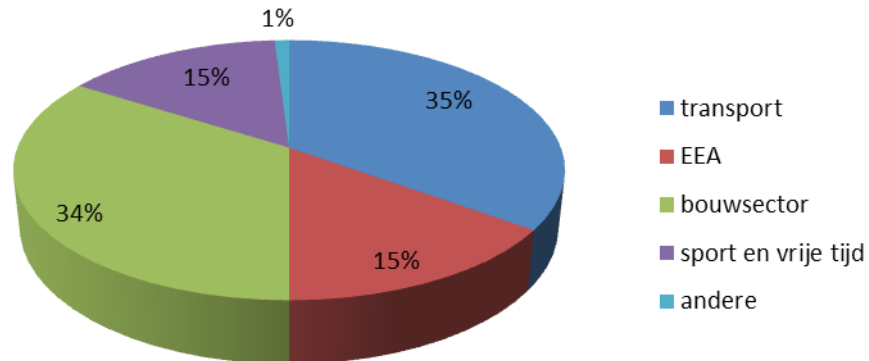
++NB: Composite materials market calculated as the value of key raw materials including : thermoset and thermoplastic resins, carbon fibers, glass fibers, fillers, additives and core materials, but excluding 'intermediate' materials such as: compounds, textiles, and preregs.

▲ **Figure 1. Global composite raw materials market growth to 2019. (Courtesy of Lucintel LLC).**

Figuur 23: Marktgrootte in waarde (Environmental scientist March 2015 , Journal of the Institution of Environmental Sciences)

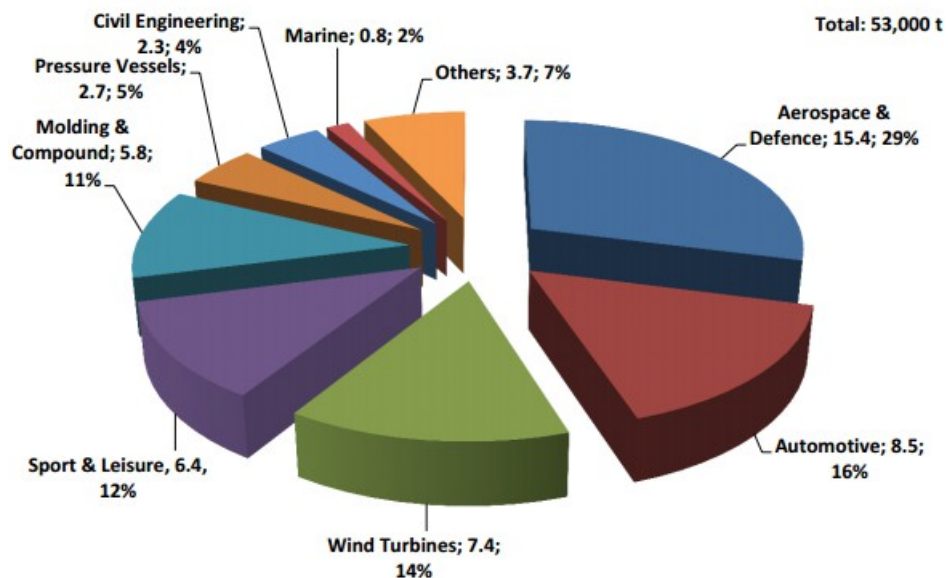
Binnen Europa liggen de voornaamste toepassingen van **glasvezelversterkte composieten** in de transport- en bouwsector (Figuur 24). Het grootste groeipotentieel ziet AVK in de productie van tanks en pijpleidingen voor infrastructuurprojecten. De vraag naar langere bladen voor windturbines is een potentiële opportuniteit voor toenemende toepassing van koolstofvezel. Windturbinebladen worden momenteel echter niet in België geproduceerd.

Toepassingen van glasvezelversterkte composieten in Europa (2015)

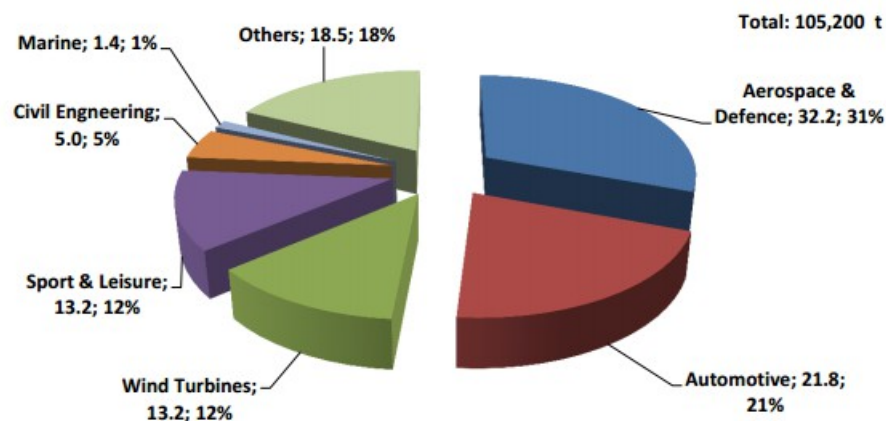


Figuur 24: GFRP in EU (bron: EuCia, AVK 2015 Market Report), noot: Construction includes wind industry

Koolstofvezelversterkte composieten worden voornamelijk gebruikt in aerospace toepassingen, automotive en sportartikelen (Figuur 25 en Figuur 26). Met name in de automobiel was er het laatste jaar een sterke groei, die deels toe te schrijven is aan de productie van lichte (o.a. elektrische) voertuigen zoals de BMW i3. Aerospace toepassingen zijn wel verantwoordelijk voor een relatief groter aandeel van de wereldwijde omzet (48% op vlak van vezels, 62% in geval van volledige composieten). Over alle sectoren en toepassingen heen bedraagt de kostprijs van koolstofvezelversterkte composieten ca. 107 €/kg.



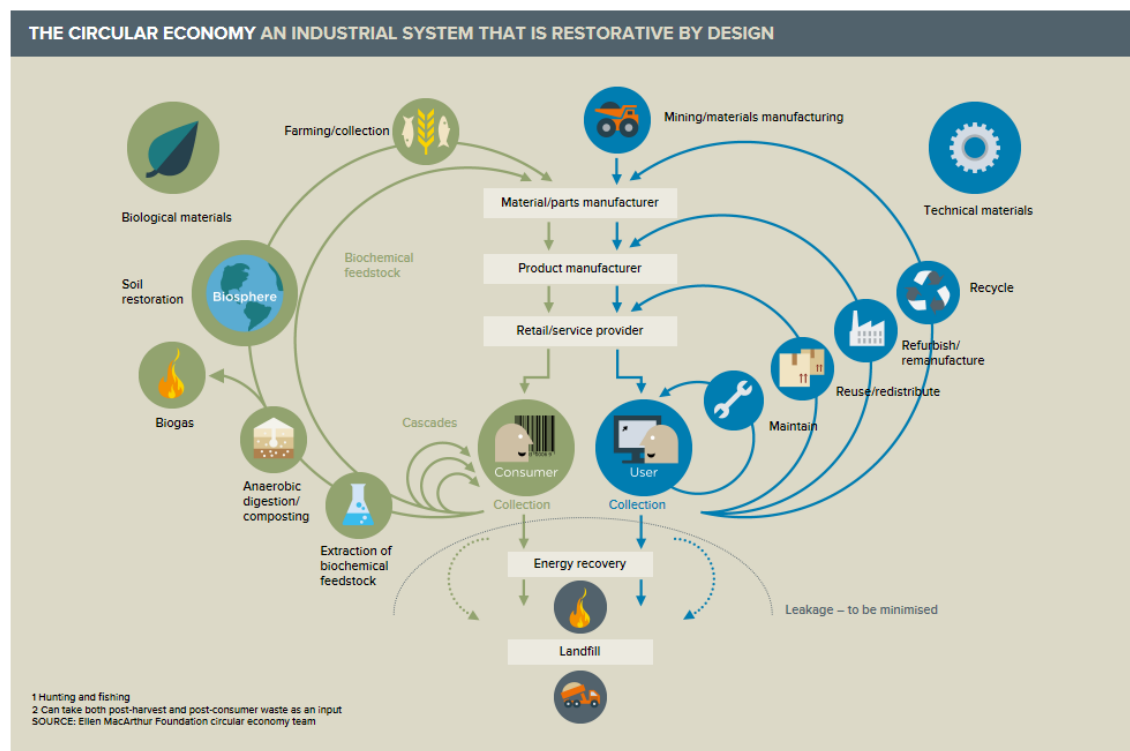
Figuur 25: Wereldwijde vraag naar koolstofvezels, per toepassing (in kton, 2014) (bron: AVK, 2015)



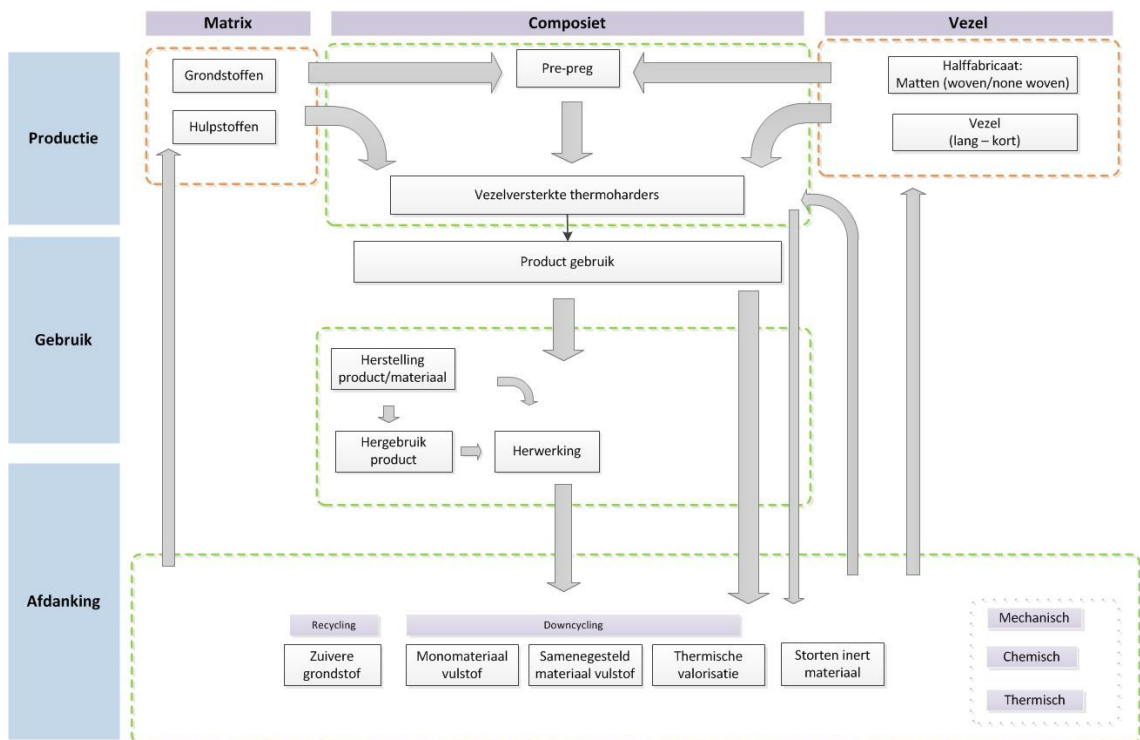
Figuur 26: Wereldwijde vraag naar koolstofvezelversterkte composieten, per toepassing (in kton, 2014) (bron: AVK, 2015)

2.6 Waardeketen van vezelversterkende thermoharders

Bekeken vanuit het perspectief van de circulaire economie (Figuur 27), situeren thermohardende composieten zich in de technische materialenkringloop omdat de matrix per definitie een technisch materiaal is (zelfs in het geval van biogebaseerde kunststoffen). De vezels kunnen ook opgebouwd zijn uit biogebaseerde grondstoffen (jute, vlas,...), maar omdat deze vezels in een thermohardende matrix gefixeerd zitten, komen ze bij einde leven in de praktijk eveneens in de technische cyclus terecht.



Figuur 27: De circulaire economie (Bron: Ellen MacArthur Foundation)



Figuur 28: Waardeketen van vezelversterkte thermoharders (bron: Sirris)

In Figuur 28 is de grondstoffencyclus van vezelversterkte thermohardende composieten weergegeven. De cyclus kan opgedeeld worden in 3 fasen:

1 Productiefase:

In deze fase worden vezelversterking en matrix samengevoegd tot een composietproduct (zie paragraaf 2.1). Dit kan in één stap gebeuren (productieprocessen, zie paragraaf 2.2.1), of via een tussenstap met de aanmaak van prepreg's (combinatie van vezels en matrix).

2 Gebruiksfase:

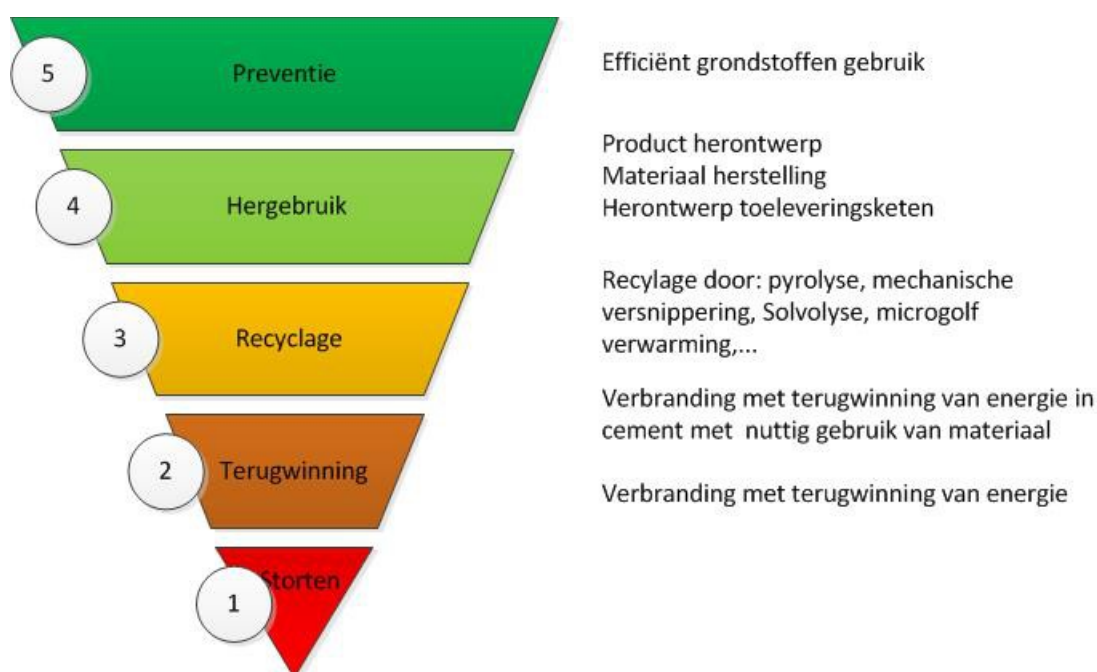
De gebruiksfase kan opgedeeld worden in twee aparte fasen. Enerzijds is er de 'hoofdgebruiksfase', d.i. het nuttige gebruik waarvoor de composieten aanvankelijk werden geproduceerd. Om de levensduur van het product te verlengen, is onderhoud en herstelling nodig (cfr. 'maintenance'). Na afdanking van het product voor zijn hoofdgebruik, kan er al dan niet een 'hergebruiksfase' volgen, waarbij het product voor dezelfde of een andere toepassing wordt hergebruikt (cfr. 'reuse'). Om het product aan te passen aan de nieuwe toepassing, kan 'herwerking' (cfr. 'remanufacturing') noodzakelijk zijn.

3 Afdankingsfase:

In deze fase wordt het product definitief afgedankt. **Hoogwaardige recyclage** (cfr. 'recycle') is de meest wenselijke optie, waarbij de 'zuivere' grondstof met behoud van zijn volledige functionaliteit opnieuw als grondstof kan worden ingezet. In het geval van thermoharders wordt dergelijke hoogwaardige recyclage momenteel niet toegepast voor volledige composietmaterialen of voor de matrix (onmogelijk te scheiden). Functionele recyclage van vezels is wel technisch mogelijk, maar momenteel enkel economisch haalbaar voor koolstofvezels. Bij de 'lagere' vormen van recyclage (**downcycling**), worden de oorspronkelijke functionaliteiten van het composiet materiaal niet of slechts gedeeltelijk benut, bijvoorbeeld door

het materiaal (vezel + matrix) te shredderen en opnieuw in te zetten als vulmateriaal of granulaat. Deze route wordt momenteel al toegepast voor glasvezelversterkte composieten. Bij **thermische valorisatie** (cfr. 'energy recovery') wordt enkel de calorische waarde van het composiet gevaloriseerd, de inerte glasvezels blijven meestal in de bodemassen achter. Koolstofvezel en aramidevezel hebben ook een calorische waarde, maar zijn zo hoogwaardig dat recyclage een meer waardevolle optie is. Biogebaseerde, natuurlijke vezels (hout, vlas, bamboe, enz.) bezitten ook een interessante calorische waarde, wat vanuit het oogpunt van thermische valorisatie interessanter is. Natuurlijke vezels worden momenteel echter slechts in zeer beperkte mate gebruikt. **Storten** (cfr. 'landfill'), ten slotte, is vanuit het oogpunt van materialenbeheer en circulaire economie de minst wenselijke optie, maar wel de dominante verwerkingsroute in Europa. Slechts 9 Europese landen hebben een stortverbod voor kunststoffen (Figuur 1).

De afvalhiërarchie voor thermohardende composieten kan als volgt ingevuld worden (Figuur 29).



Figuur 29: De afvalhiërarchie voor thermohardende composieten

Om hergebruik en hoogwaardige recyclage mogelijk te maken, is het nodig dat de afgedankte composiet materialen ingezameld kunnen worden vanuit hun respectievelijke toepassingen. De kosten die gepaard gaan met een dergelijke inzameling vormen vaak een economische hinderpaal door de lage gewicht/volume-verhouding van composietmaterialen en het niet beschikbaar zijn van mobiele recyclagesystemen. Deze materialen worden in de praktijk meestal verbrand of gedowncycled.

3 Afvalstromen van vezelversterkte thermoharders

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een inschatting gemaakt van de volumes vezelversterkte thermoharders (waar mogelijk opgesplitst per type vezelversterking) die in Vlaanderen en in de ons omringende landen vrijkomen op dit moment en die naar verwachting zullen vrijkomen in de nabije toekomst.

3.2 Afvalstromen van glasvezelversterkte composieten

3.2.1 Productieafval

Op basis van gesprekken met een gebruikersgroep leidde een Nederlandse studie¹³ de vuistregel af dat de hoeveelheid productieafval ca. 5% van de totale productie bedraagt. Dit cijfer werd grotendeels bevestigd door de sectorbevraging van de Vlaamse/Belgische bedrijven, al is er een sterke variabiliteit naargelang het gebruikte productieproces. Bij productieprocessen op basis van hand lay-up, constructies van composietmaterialen en bewerkingen van materialen tot maatwerk producten (bv. uitsnijdingen in panelen) ligt de hoeveelheid productieafval meestal hoger, nl. 10 tot 15%, terwijl automatische, continue processen, zoals pultrusie, slechts een uitval kennen van 1 tot 2%. Gemiddeld kan dus aangenomen worden dat de hoeveelheid productieafval van glasvezelversterkte composieten tussen de 5 en 10% van het productievolume bedraagt.

Naar schatting komt **jaarlijks ca. 4.000 ton productieafval van glasvezelversterkte composieten** vrij in België¹⁴. Vermoedelijk is echter niet al dit afval afkomstig van Belgische productiebedrijven, maar is een deel hiervan afkomstig van de bewerking van ingevoerde halffabricaten (bv. versnijden van sandwichpanelen). Productieafval wordt in zeer beperkte mate opnieuw als grondstof ingezet binnen sommige bedrijven zelf. Ook vervallen producten (pre-consumer), zoals hars, worden soms opnieuw opgemengd met nieuw hars - indien de eigenschappen dit toelaten - en opnieuw (eventueel tegen een lagere prijs) op de markt gebracht. Het overgrote deel van het productieafval wordt echter via een afvalophaler afgevoerd. De producenten zijn meestal niet op de hoogte van de uiteindelijke bestemming en verwerking van hun afval. Vanuit de afvalverwerkende sector wordt er momenteel slechts beperkt informatie gedeeld over de hoeveelheden afval die opgehaald worden, de eventuele sortering of behandeling en de eindverwerking van deze stromen.

Ca. 2-3.000 ton van dit productieafval bestaat uit een relatief zuivere afvalstroom, voornamelijk afkomstig van grote spelers, die gescheiden wordt ingezameld. Deze stroom wordt momenteel grotendeels afgezet bij Belgische cementovens, ter vervanging van grondstof (ca. 2/3) en brandstof (1/3)¹⁵.

De overige 1.000 ton afval is voornamelijk afkomstig uit kleinere bedrijven en wordt, vermengd met ander bedrijfsafval, via het restafval opgehaald. Dit afval is te vervuild om gerecycleerd te worden en wordt ook niet uitgesorteerd. Deze stroom komt terecht in de afvalverbranding.

¹³ MJA Composieten Recycling, KEMA, 2010

¹⁴ inschatting op basis van de antwoorden tijdens de sectorbevraging

¹⁵ Percentages materiaalrecyclage en energetische valorisatie op basis van EuCIA

Tot voor kort was er in Wallonië een bedrijf dat actief was binnen de recyclage van thermohardend composiet materiaal. Reprocover produceerde uitgaande van glasvezelversterkt polyester afval nieuwe producten zoals putdeksels, kabelgoten voor spoorwagoepassingen, railsleepers, ... Reprocover is eind verleden jaar failliet verklaard.

De meeste van de bevroagde productiebedrijven geven aan geïnteresseerd te zijn in de verwerkingsopties voor hun afval en in eventuele mogelijkheden voor recyclage. Deze interesse vloeit vooral voort uit een afvalproblematiek (kost), eerder dan een vraag naar gerecycleerde grondstoffen.

3.2.2 EoL-afval

De te verwachten volumes glasvezelversterkt EoL-afval in België en de omringende landen zijn moeilijk in te schatten, aangezien de composietenmarkt zeer internationaal georganiseerd is. Van de Belgische composietenproductie is ca. 90% bestemd voor export. Daarnaast worden ook zeer veel producten geïmporteerd. Bovendien hebben de toepassingen waarin composieten worden gebruikt typisch een lange levensduur, waardoor het ook moeilijk is om in te schatten wanneer deze producten EoL worden.

Uit het taartdiagram in Figuur 24 blijkt dat de toepassing van glasvezelversterkte thermoharders in Europa vooral plaatsvindt binnen de sectoren transport en constructie (inclusief wind energie). De producten uit deze doelsectoren hebben elk hun specifieke levensduur (Tabel 8). Auto's en vrachtwagens hebben in regel een kleinere levensduur dan windmolens die op hun beurt een kleinere levensduur hebben dan boten. Deze markten hebben ook op verschillende tijdstippen de stap gemaakt naar massaal gebruik van composieten. Zo werden thermohardende composieten in een vroeger stadium in boten gebruikt (vanaf de jaren 60 en 70) dan in andere sectoren zoals automobiel¹⁶. Het EURECOMP project, een onderzoek in 12 Europese landen, gaf aan dat het productie- en EoL-afval van bootbouw een afvalstroom van 10.000 ton/jaar vertegenwoordigt¹⁶¹⁷. Binnen 30 jaar zal bijvoorbeeld de nieuwe generatie vliegtuigen (waarbij 50% van het gewicht uit koolstofvezel versterkt polyester bestaat) afgeschreven zijn, waardoor tegen 2025 wereldwijd 8.500 commerciële vliegtuigen (met elk 20 ton CFRP) afgedankt zullen worden, resulterend in 170.000 ton CFRP afval¹⁸. Hoewel deze afvalstroom op dit moment nog zeer klein is, zal deze dus zeer snel aan belang winnen.

Toepassingsgebied	Technische levensduur
Luchtvaart	30 – 50 jaar
Scheepsbouw	30 – 45 jaar
Transport (automobiel en trein)	10 – 30 jaar
Silo's en bouwtoepassingen	50 – 100 jaar
Windmolens	20 – 30 jaar
Elektronica en elektriciteit	2 - 10 jaar

Tabel 8: Levensduur van toepassingen van composietmaterialen

— Afkomstig van windmolens

¹⁶ Tijdschrift 'Varen' uitgave Juni 2015, auteur Guido Machiels

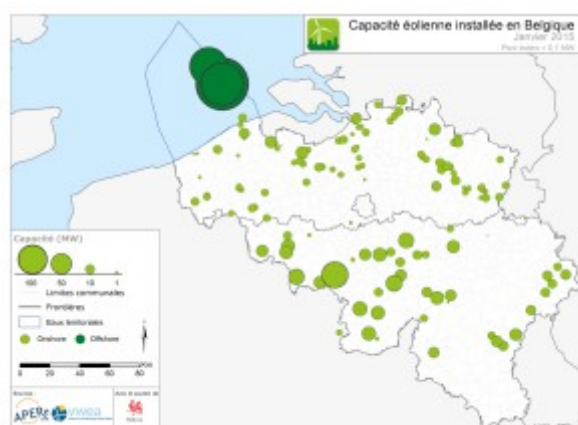
¹⁷ Oliveux G et al. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties. Progress in Material science 72 (2015) 61-99

¹⁸ Pimenta S, Pinho ST, 2011, Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook, *WASTE MANAGEMENT*, Vol: 31, Pages: 378-392, ISSN: 0956-053X. Bron cijfers: Boeing

Zuivere en relatief omvangrijke EoL-afval stromen zijn afkomstig van windmolens. In 2015 was in de EU 129 GW aan windenergie geïnstalleerd. Volgens inschattingen van EWEA¹⁹ zal windenergie tegen 2030 28,5% en tegen 2050 50% van de elektriciteitsconsumptie vertegenwoordigen. Dit komt overeen met respectievelijk 400 GW (waarvan 150 GW offshore) en 735 GW (waarvan 460 GW offshore). Per MW geïnstalleerd vermogen is naar schatting 10 tot 15 ton composietmateriaal nodig²⁰.

Windmolens hebben typisch een levensduur van 20 tot 30 jaar. Inschattingen geven aan dat tegen 2034 ca. 225 000 ton aan EoL windmolenbladen zullen moeten worden gerecycleerd²¹. Recyclage is echter geen evidentie. De enorme omvang van deze bladen maakt het moeilijk om ze te ontmantelen, te transporteren en te versnijden. Daarnaast is de kwaliteit van de vezels mogelijk verminderd door de jarenlange blootstelling aan weersinvloeden (hagel, sneeuw, zonlicht) en omgevingscondities (vocht, zout), waardoor herinzet van het recycalaat als structureel materiaal niet zonder meer mogelijk is²². Doordat de relatief jonge windtechnologie zeer snel evolueert (hogere efficiëntie en rendementen) is het hergebruik van wieken nog niet haalbaar. Wijzigingen in geometrie gaan te snel om wieken te hergebruiken. Momenteel worden EoL windmolenbladen verwerkt en ingezet in cementovens, waar ze deels fossiele brandstof en deels grondstof vervangen (asgehalte van meer dan 60%).

Het huidige geïnstalleerd vermogen aan windmolens in **België** bedraagt ca. 2300 MW²³, wat volgens bovenstaande schatting overeenkomt met ca. 28 000 ton aan composietmaterialen. Rekening houdend met de bijkomende jaarlijkse capaciteit (ca. 300 MW aangroei per jaar sinds 2010), kan ruwweg ingeschat worden dat vanaf 2030 ca. 3000 ton/jaar aan windmolenbladen EoL zullen worden (Figuur 31).



Figuur 30: Geïnstalleerd vermogen aan windenergie in België (2015). (Bron: APERE)

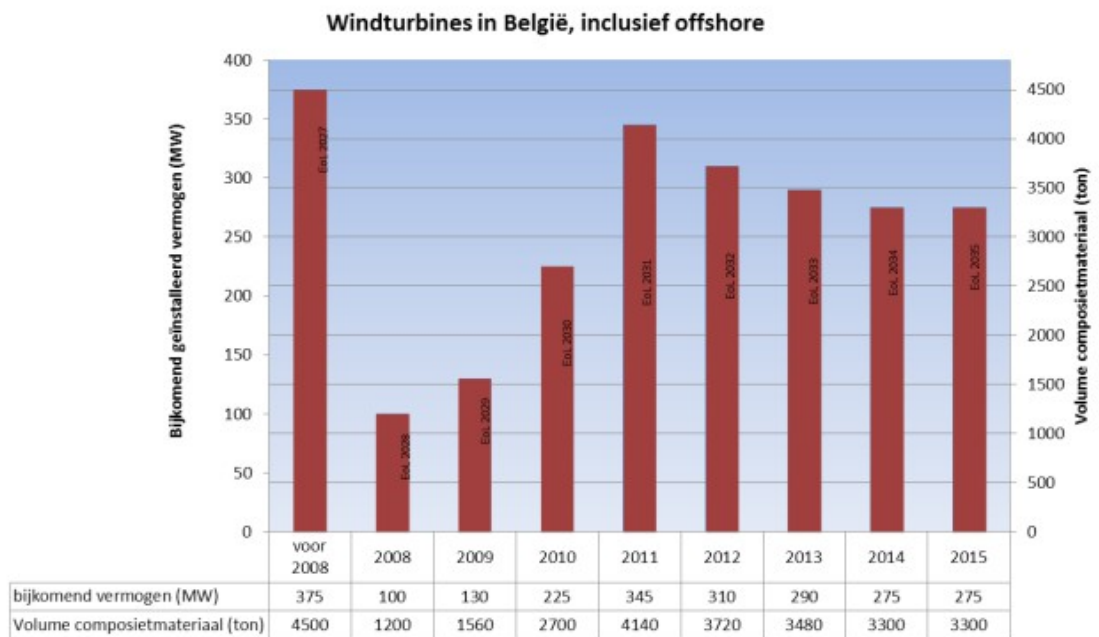
¹⁹ European Wind Energy Association. Research note Recycling Wind Turbine Blades. http://www.ewea.org/fileadmin/files/our-activities/policy-issues/environment/research_note_recycling_WT_blades.pdf

²⁰ EWEA, op basis van ReFiber ApS 2010 report

²¹ <https://www.wind-watch.org/documents/recycling-wind-blades/>

²² Cherrington, R., et al., Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. Energy Policy (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.076>

²³ APERE, 2015. <http://www.apere.org/observatoire-%C3%A9olien>



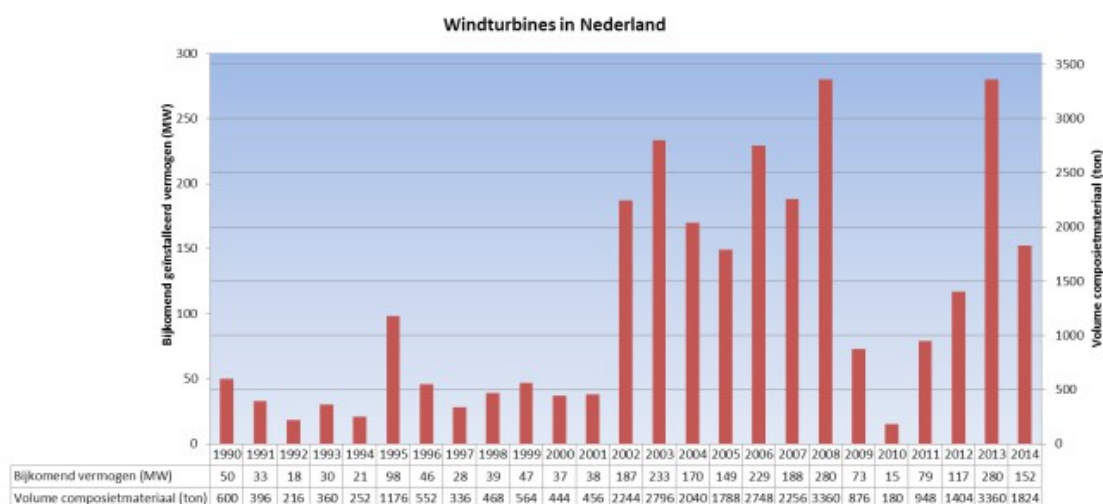
Figuur 31: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en overeenkomstige hoeveelheid composietmateriaal (België)

In **Nederland** is momenteel ca. 2600 MW aan windenergie geïnstalleerd (voornamelijk in Noord-Nederland, Figuur 32), wat overeenkomt met een totaal volume van ca. 32 000 ton composietmateriaal. De komende jaren zal naar schatting ongeveer 400 ton per jaar EoL worden, vanaf 2025 zal dit toenemen naar ca. 2000 ton per jaar (Figuur 33). Andere bronnen vermelden een verwacht volume van 700 ton per jaar de komende 25 jaar²⁴. Op dit moment worden de EoL rotoren naar Oost-Europa en Afrika verscheept.

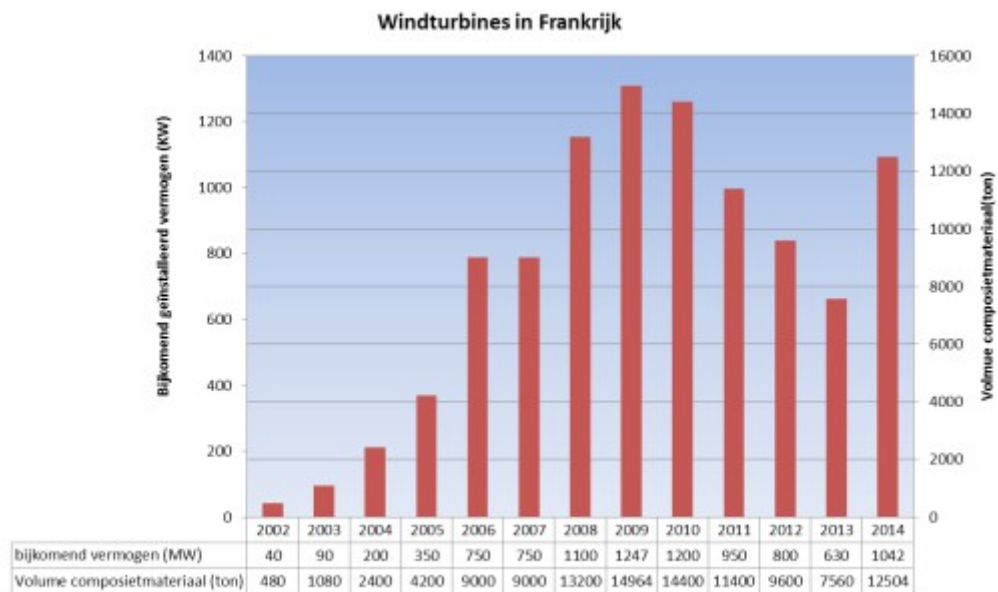


Figuur 32: Windenergie in Nederland
(<http://www.windenergie-nieuws.nl/nederland/>)

²⁴ Ten Busschen A. , 2016. Hergebruik van end-of-life thermoharde composietproducten. VKCN –SEMINAR Recycling van composieten:Probleem, kans of al opgelost? 16 maart 2016, Zwolle



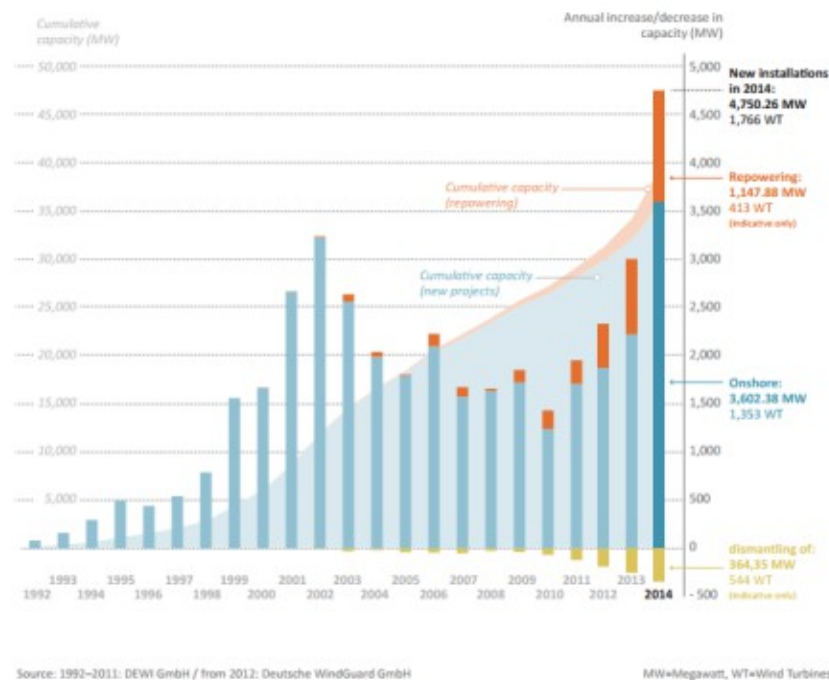
Figuur 33: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en overeenkomstige hoeveelheid composietmateriaal (Nederland)



Figuur 35: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en overeenkomstige hoeveelheid composietmateriaal (Frankrijk)

Duitsland bezat ca. 45 000 MW aan totaal geïnstalleerd vermogen in 2014, waarvan 42 000 MW land-based en 3000 MW offshore (vnl. in Noord- en Centraal Duitsland). Dit komt overeen met ca. 540 000 ton totaal volume composietmateriaal. In 2014 werd 365 MW ontmanteld, d.i. ca. 4400 ton composiet (Figuur 36). Naar schatting zal in de periode 2020-2030 ca. 20 000 ton/jaar EoL windmolens vrijkomen.

Development of annual installed and cumulative onshore wind capacity (MW) in Germany (as of 31 December 2014)



Figuur 36: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en ontmanteling van EoL windmolens (Duitsland)

— Afkomstig van andere toepassingen

Toepassingen in de transport- en de bouwsector hebben typisch een lange levensduur.

In België startte in april 2016 het bedrijf Aerocircular op (Oostende)²⁶. Zij beogen om luchtvaartmaatschappijen bij te staan in hun 'fleet outphasing management', het uit-dienst nemen van **vliegtuigen** (levensduur 30-50 jaar). Aerocircular zal de vliegtuigen selectief ontmantelen met het oog op hergebruik van onderdelen en hoogwaardige recyclage van materialen.

Het aantal **pleziervaartuigen** (levensduur 30-45 jaar) in België is onbekend. EoL-boten worden door de Belgische havens als een probleem gemeld, omdat sommige verwaarloosde jachten na verloop van tijd beginnen te zinken en de haven niet zelf het initiatief kan nemen om deze af te voeren voor verwerking. In Nederland vormen EoL boten eveneens een significant afvalprobleem. Volgens een Nederlandse studie²⁷ telt Nederland ca. 400 000 pleziervaartuigen (waarvan meer dan 80% een polyester romp heeft, goed voor meer dan 280 000 ton polyester of gemiddeld 0,9 ton per boot, al is er een sterke variatie tussen verschillende boottypes). Bovendien wordt gesteld dat ca. 100 000 EoL boten (vooral kleine bootjes, kano's en surfplanken, goed voor ca. 4000 ton polyester) nog op verwerking liggen te wachten in tuinen, schuurtjes en garages. In totaal is er dus een totaal van ca. 300.000 ton composietmateriaal opgeslagen in boten allerhande, die op de korte of lange termijn EoL zullen worden. Inzamelkanalen en verwerkingsinfrastructuur zijn momenteel niet aanwezig. Het is moeilijk in te schatten wanneer deze boten juist in de afvalverwerking zullen terecht komen, maar ten Busschen (2016)²⁸ gaat uit van een jaarlijkse hoeveelheid composieten uit boten van ca. 4000 ton de komende 15 jaar.

Composietmaterialen uit **automobiel en rail toepassingen** (levensduur 10-30 jaar, zowel glasvezel- als koolstofvezelversterkt materiaal) worden momenteel niet gescheiden verwerkt. Bij ELV-verwerking worden eerst bepaalde schadelijke onderdelen (bv. banden, katalysator, filters, batterijen, enz.) en vloeistoffen verwijderd (depollutie). Nadien wordt het resterende voertuig volledig geshred. In een PST-installatie (post-shredder technologie) wordt het geshred materiaal vervolgens in een opeenvolging van scheidingsstappen gesorteerd. De ELV-richtlijn legt globale recyclagepercentages op voor ELV-verwerking. Sinds 2015 moet minstens 85% van het gemiddelde voertuiggewicht op jaarbasis gerecycleerd worden, terwijl minstens 95% nuttig toegepast moet worden. Daarnaast wordt opgelegd dat fabrikanten reeds in de ontwerpfase rekening houden met het einde leven: nieuwe voertuigen die op de markt worden gebracht, moeten voor minimum 85 % van hun gewicht herbruikbaar en/of recycleerbaar en voor minimum 95 % van hun gewicht herbruikbaar en/of nuttig toepasbaar zijn. Deze percentages worden globaal opgelegd, en niet verder gespecificeerd volgens materiaalcategorie. Aangezien het gewicht de basis vormt voor de doelstelling, werd prioritair ingezet op de terugwinning van (bulk)metalen. Door de graduele verstrenging van de doelstelling kwam er ook steeds meer aandacht voor de terugwinning van kunststoffen. De huidige ELV-verwerkingsprocessen zijn dan ook ontworpen met het oog op het terugwinnen van metalen (met zeer hoge efficiëntie) en thermoplastische kunststoffen (zoals ABS, PP, PE en PS) die worden opgewerkt tot gerecycleerde granulaten voor de kunststoffenindustrie. De thermohardende kunststoffen, waarvoor de recyclagemogelijkheden beperkt zijn, komen uiteindelijk in een restfractie terecht, die verbrand wordt als RDF(refuse derived fuel), wat geldt als nuttige toepassing. Het huidige proces is niet in staat deze composieten gericht af te scheiden. Manuele ontmanteling van composieten gebeurt wel in het geval van grote panelen (zoals bv. bij vrachtwagens), maar is niet haalbaar in het geval van personenwagens, aangezien er een grote variabiliteit is in de toepassing van composieten tussen verschillende modellen, waardoor standaardrichtlijnen niet mogelijk zijn. Daarnaast is de identificatie van composieten een probleem en is het ontwerp van

²⁶ <http://aerocircular.green/>

²⁷ Waterrecreatie Advies BV, 2014. Aantal 'end of life' boten in Nederland en potentiële afvalstromen – Inclusief actualisatie aantal pleziervaartuigen in Nederland 2005 -2014.

http://www.hiswa.nl/hiswa.nl/up1/ZijhpkfJC__End_of_life__boten_in_Nederland.pdf

²⁸ Ten Busschen A., 2016. Hergebruik van end-of-life thermoharde composietproducten. VKCN –SEMINAR Recycling van composieten: Probleem, kans of al opgelost? 16 maart 2016, Zwolle

wagens niet aangepast op een vlotte demontage. De kosten van demontage zijn hierdoor te hoog in vergelijking met de mogelijke opbrengsten van een betere materiaalscheiding.

Voorgevormde **zwembaden** hebben een levensduur van 30-45 jaar en bestaan uit ca. 1,2 ton glasvezelversterkt composietmateriaal per zwembad. Volgens een inschatting van de BSPA (Belgian Swimming Pool Association) bezitten 50 tot 70 000 Belgische gezinnen een zwembad en stijgt dit aantal nog steeds²⁹. Indien we grofweg uitgaan van een jaarlijkse bouw van 3000 zwembaden, komt dit neer op 3500 ton composietmateriaal dat in de toekomst jaarlijks eindeleven zal zijn. EoL zwembaden, **silo's, panelen, profielen en elektriciteitskasten** komen verspreid in plaats en tijd vrij (soms levensduur tot 100 jaar), in kleine volumes en zijn meestal te vervuilen om opnieuw als recyclelaat ingezet te kunnen worden. Ze komen typisch terecht bij de grof vuil fractie en worden niet verder uitgesorteerd, maar naar afvalverbranding afgevoerd. In Nederland worden rioolbuizen sinds 1995 gerenoveerd met liners die geïmpregneerd zijn met epoxyharsen. Vanaf 2050 zouden deze liners eveneens EoL worden, wat zou betekenen dat er ca. 1250 ton composietmateriaal per jaar zou vrijkomen vanuit deze toepassing.

Printplaten in elektrische en elektronische apparaten (EEA) bestaan uit een dragerplaatje van epoxyhars, waarop de verschillende elektronische componenten aangebracht zijn. Volgens cijfers van Recupel werd in 2015 in België meer dan 111.000 ton afgedankte EEA (AEEA) ingezameld via het Recupel netwerk, wat neerkomt op 39% van de toestellen die op de markt werden gebracht. Hierbij werden 1107 ton printplaten selectief verwijderd met het oog op verdere verwerking, hetzij door manuele disassemblage, hetzij via gerichte uitsortering na shreddering (Tabel 9). De printplaatfractie is interessant voor recyclage aangezien ze belangrijke concentraties aan waardevolle metalen bevat (goud, zilver, palladium, enz.). De recyclage van deze printplaten gebeurt dan ook met het oog op het recupereren van deze metalen (bv. Umicore, Hoboken). Typisch wordt bij de recyclage een pyrometallurgisch proces gebruikt, waarbij het dragermateriaal uit epoxyhars als brandstof fungeert.

2015*	Vlaanderen	België
Gedemonteerde printplaten	247054 kg	439237 kg
Geshredderd (circuit board fraction)	426205 kg	667975 kg
Totaal	673259 kg	1107212 kg
* De printplaten die niet als monostroom worden afgevoerd (hetzij na selectieve demontage, hetzij als afgescheiden fractie na shredderen) zijn niet opgenomen in de vermelde cijfers.		

Tabel 9: Printplaten vrijgekomen als gevaarlijk afval tijdens de verwerking van AEEA in 2015 (bron: 'Rapport 2015-België' en 'Rapport 2015-Vlaanderen', opgemaakt door de vzw Recupel)

Een belangrijke hoeveelheid materiaal van printplaten komt na shredderen ook terecht in een mixstroom printplaten/kabelafval. Het aandeel printplaten in deze mixstroom is echter ongekend. De cijfers van Recupel geven dus een onderschatting van de hoeveelheid printplaten die aanwezig zijn in AEEA. Volgens Sohaili (2012) maakt de printplaatfractie gemiddeld 3% uit van het gewicht aan AEEA, waarbij de printplaat zelf bestaat uit metalen (40%), plastics (voornamelijk epoxyharsen, 30%) en keramiek (30%)³⁰. Volgens deze inschattingen zou de hoeveelheid printplaten die terecht komen in de kabelfractie en andere fracties zelfs tot 2 keer zo hoog kunnen liggen als de teruggewonnen monostroom. De 1107 ton printplaten die via Recupel worden teruggewonnen vertegenwoordigen volgens de schatting van Sohaili ongeveer 330 ton composietmateriaal.

Bovendien wordt ook een significante hoeveelheid AEEA en printplaten niet via de Recupel-

²⁹ <http://www.habitos.be/nl/tuin/privezwembad-zit-in-de-lift-4480/>

³⁰ Sohaili J., Muniyandi S.K., Mohamad S.S. (2012). A Review on Printed Circuit Boards Waste Recycling Technologies and Reuse of Recovered Nonmetallic Materials. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 2, February-2012 1 ISSN 2229-5518. <http://www.ijser.org/researchpaper/A-Review-on-Printed-Circuit-Boards-Waste-Recycling-Technologies.pdf>

kanalen (Recupel zelf en charter-operatoren) ingezameld, maar via andere partijen, zoals formele of informele ontmantelaars, herstellende, metaalophalers, enz... Volgens inschattingen van Huisman et al. (2007)³¹, zou de effectieve hoeveelheid AEEA die vrijkomt in België (maar dus niet allemaal bij Recupel terecht komt) rond de 220 000 ton (2014) liggen. Dit betekent dat ongeveer de helft van de AEEA niet via de Recupelkanalen wordt ingezameld.

Ruwweg kan gesteld worden dat via de AEEA in België jaarlijks 2000 tot 6000 ton printplaten einde-leven worden, die 700-2000 ton composietmateriaal vertegenwoordigen.

In Nederland zou de hoeveelheid composietafval die via de printplaatfractie wordt verbrand meer dan 3000 ton per jaar bedragen³², wat overeenkomt met onze inschatting op basis van de AEEA cijfers van Huisman en een gemiddelde printplaatfractie van 3%. Voor Frankrijk, Duitsland en het VK, gaat het volgens dezelfde berekeningswijze respectievelijk om 11 200, 15 600 en 11 300 ton.

3.3 Afvalstromen van koolstofvezelversterkte composiet

Over de afvalstromen van koolstofvezelversterkte composieten werden geen richtcijfers teruggevonden. Deze volumes bedragen echter slechts een fractie van de hoeveelheid glasvezelafval. Dergelijke afvalstromen komen in zeer kleine hoeveelheden vrij, bv. bij herstellende van sportmateriaal (bv. carbonfietsen) en bij de verwerking van ELV (momenteel voornamelijk sportwagens en elektrische wagens). Gezien de kleine volumes komt dit afval bij het restafval terecht, aangezien het economisch niet haalbaar is om hier inzamelingskanalen voor op te zetten. Niettemin zijn er enkele bedrijven die gericht inzetten op de recyclage van koolstofvezels, gezien de relatief hoge marktwaarde (zie verder). Inzameling van voldoende volumes vormt hierbij een uitdaging. Deze recyclagepiste richt zich momenteel op productie uitval.

3.4 Overzicht afvalstromen

Voor 2015 werd geschat dat de hoeveelheid composietafval in de EU 251.000 ton EoL-afval en 53.000 ton productieafval zal bedragen³³. Tabel 10 geeft een richtinggevend overzicht van de verschillende afvalfracties in België en de buurlanden.

31 Huisman J, Magalini F, Kuehr R, Maurer C, Ogilvie S, Poll J, Delgado C, Artim E, Szlezak J, Stevels A. (2008). 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Final report. http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/final_rep_unu.pdf

32 Ten Busschen A., 2016. Hergebruik van end-of-life thermoharde composietproducten. VKCN –SEMINAR Recycling van composieten: Probleem, kans of al opgelost? 16 maart 2016, Zwolle

33 <http://www.mace.manchester.ac.uk/our-research/research-themes/innovative-manufacturing/research-projects/exhume/>

	Totaal productie volume 2014 (kton/jaar)	Productie-afval (kton/jaar)	EoL-afval, composietfractie (kton/jaar)
België	20 ¹	4	2-3 (windmolenbladen, vanaf 2030) 1-2 (printplaten) 2-4 (zwembaden) ? (boten) ? (bouwafval) ? (automobiel)
VK	146 ⁵ (+ Ireland)	15* ³ 1-2** ³	50* ³ Zeer weinig** ³
Duitsland	200 ⁵	20 ⁴	4,4 (windmolenbladen in 2014) 20 (windmolenbladen, vanaf 2020-2030) 15,6 (printplaten)
Frankrijk	108 ⁵	10 ⁴	10 (windmolenbladen, vanaf 2030) 11 (printplaten)
			30 (totaalinschatting voor Frankrijk, AB-VAL)
Nederland	23 ⁵ -100 ²	5-6 ²	1-2 (windmolenbladen) 4 (boten) 1,2 (rioolrelining, vanaf 2050) 3 (printplaten)
* GFRP ** CFRP <i>Cursieve cijfers:</i> eigen berekening ¹ Inschatting op basis van sectorbevraging. Volgens AVK⁵ bedroeg de composietproductie in 2014 op basis van glasvezel voor de Benelux samen 43 kton. ² MJA Composieten Recycling, KEMA, 2010 ³ Environmental scientist, March 2015. GRP afval in het VK wordt verwacht om met een factor 2,5 toe te nemen tegen 2030, CFRP met een factor 3. Dit is significant, maar nog steeds klein in vergelijking met een totale afvalstroom aan kunststoffen van 4,3 miljoen ton per jaar. ⁴ berekend op basis van vuistregel 10% productieafval ⁵ AVK, 2015. Composites Market Report 2015.			

Tabel 10: Geschatte huidige jaarlijkse afvalvolumes thermohardende composieten in verschillende landen
(noot: er zit een grote onzekerheid op deze cijfers, wegens gebrek aan data)

4 Recyclage van thermohardende composieten

Composietmaterialen verschillen van traditionele materialen doordat ze hun waardevolle eigenschappen in belangrijke mate ontleen aan hun fysische structuur en de ordening van de verschillende samenstellende grondstoffen. Composieten kunnen in dat opzicht eerder als 'component' beschouwd worden. Hierdoor vormt hoogwaardige en functionele recyclage (recyclage waarbij de functionaliteit van de oorspronkelijke composiet zo goed mogelijk behouden blijft) van deze materialen een bijzondere uitdaging. Traditionele recyclagemethodes zijn immers meestal gericht op mechanische verkleining en sortering in vrij homogene materiaalstromen (vaak gevolgd door hersmelting). Bij thermohardende composieten speelt bovendien nog het bijkomende probleem dat thermohardende kunststoffen niet hersmolten kunnen worden tot nieuwe onderdelen (in tegenstelling tot thermoplasten, die wel tot nieuw granulaat kunnen worden verwerkt). Recyclage van deze materialen gaat dus steeds gepaard met enig verlies in functionaliteit.

Hoewel er wel enkele mature recyclageroutes voorhanden zijn en er heel wat onderzoek naar meer hoogwaardige recyclage plaatsvindt, gebeurt composietrecyclage in de praktijk zeer weinig en komen afvalstromen meestal bij het restafval terecht. De hinderpalen zijn vaak economisch van aard. Bovendien is de marktwaaarde van de meeste gerecupereerde grondstoffen en recyclaten uit vezelversterkte composieten te laag om een rendabele recyclage mogelijk te maken en is de markt voor gerecycleerd composietmateriaal nauwelijks ontwikkeld. Daarnaast speelt de onzekerheid op vlak van plaats en tijdstip van het vrijkomen van voldoende afvalvolumes een belangrijke rol.

In dit hoofdstuk wordt aangegeven welke verwerkingstechnologieën in Vlaanderen/België al operationeel zijn en worden enkele voorbeelden gegeven van herstel en (onderdelen)hergebruik uit binnen- en buitenland.

4.1 Recyclageprocessen

Door stijgende prijzen voor storten, stortverboden in sommige landen (meerdere landen hebben een stortverbod opgelegd vanaf 2020) en een toegenomen milieubewustzijn in de sector, wint de recyclage van composietafval aan belangstelling. De economische haalbaarheid van recyclage is afhankelijk van de waarde van de resulterende recyclaten, hun kwaliteit en volume. Hierbij is vooral het vezelmateriaal en de vezellengte van belang³⁴. Ook de 'zuiverheid' van het afval speelt een rol, waardoor recyclage activiteiten vooral gebruik maken van productieafval, eerder dan van 'vervuild' EoL-afval.

De recyclageprocessen voor vezelversterkte thermohardende composieten kunnen opgedeeld worden in 3 groepen:

- Mechanische recyclage: hierbij worden de composieten geshred of vergruisd. Het resulterende materiaal heeft potentieel nog steeds versterkende eigenschappen en kan vervolgens worden hergebruikt als versterkend materiaal in de productie van nieuwe (composiet)materialen of als vulstof in andere materialen (vervangmiddel voor CaCO_3);
- Chemische recyclage: via een chemische techniek wordt de matrix opgelost en kan de vezel hergebruikt worden, bv. koolstofvezel kan ingezet worden in de productie van nieuwe composieten;
- Thermische recyclage: via thermische processen (verbranding, pyrolyse, fluidised bed) wordt de composiet geheel of gedeeltelijk omgezet in energie. De vezels kunnen bij

³⁴ <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>

sommige van deze processen worden teruggewonnen als materiaal. Een specifieke vorm van thermische recyclage is de inzet van composietafval als brandstof- en grondstofvervanger in cementovens, ook wel co-processing genoemd. Hierbij wordt zowel materiaal als energie teruggewonnen (EUCIA, 2011. Position Paper. Glass fibre reinforced thermosets: recyclable and compliant with the EU legislation).

4.1.1 Mechanische recyclage

Bij mechanische recyclage wordt de composiet vermalen tot een fijn poeder dat als grondstof kan worden hergebruikt, of tot een grover granulaat dat als vulstof kan worden gebruikt (en waarbij de vezellengte deels behouden blijft). Deze vorm van recyclage bestaat al meerdere decennia en wordt vooral gebruikt voor de recyclage van glasvezelversterkte materialen. In de VS werd in de jaren '70 al glasvezel houdend afval vergruisd en hergebruikt voor de productie van bootonderdelen of badkuipen via spray-up technieken³⁵. Ook voor de productie van treinbielsen, tegels en parkeerdrempels kunnen gerecycleerde glasvezels worden gebruikt (Eco Wolf, Florida, US³⁶).

Het shredden van composietmaterialen tot een fijn poeder dat als **vulmateriaal** kan worden gebruikt is een mature verwerkingsroute. De gerecycleerde composiet vervangt dan echter eerder laagwaardige materialen, zoals calciumcarbonaat (ca. € 300/ton), waarbij de oorspronkelijke functionaliteit (sterkte, structuur) van de composiet grotendeels verloren gaat. Bovendien is er heel wat energie nodig om het materiaal voldoende fijn te vermalen, waardoor commercialisatie veelal niet haalbaar is (ERCOM composite Recycling GmbH (Duitsland) recycleerde tussen 1990 en 2004 automobiel onderdelen tot vulmateriaal voor SMC composieten, maar stopte nadien). De werkwijze beperkt zich dan ook veelal tot de recyclage van productieafval binnen een bedrijf. Dit kan worden geïllustreerd m.b.v. 2 Britse producenten van lichtkoepels en dakbedekking die een deel van hun eigen productieafval vergruizen om te recyclen in roofing, dakgoten en naamplaatjes (Filon Products, Burntwood, UK³⁷ en Hambleside Danelaw, Inverness, UK³⁸). Vooral het afscheiden en hergebruiken van de vezels als versterking lijkt veelbelovend. In het BEAWARE-project (2005-2008)³⁹ werd voor poeder en vezels uit GFRP-afval onderzocht of deze als vulstof in cement-, beton- en rubberproducten voor de bouwsector kunnen worden gebruikt ter vervanging van fijne aggregaten en industrieel rubber (isolatiemateriaal). De resulterende producten vertoonden verbeterde fysische eigenschappen en de rapporten vermelden ook economische voordelen, maar het proces werd niet verder gecommercialiseerd³⁵.

De Belgische onderneming Reprocover (Henri-Chapelle)⁴⁰ voerde een proces waarbij granulaat van thermohardend kunststofafval (polyesters, bakeliet, polyurethaan, epoxy, al dan niet in composietvorm), en glasvezelafval (afkomstig van het naburige 3B-the fibreglass company⁴¹) gerecycleerd werden tot een nieuwe grondstof. Reprocover maakte putdeksels, kabelgootdeksels, straatpotten en andere onderdelen voor de spoor- en wegenbouw. Reprocover recycleerde ook zijn eigen productieafval (zelfs het recyclagestof dat als additief voor beton wordt gebruikt). In oktober 2015 legde Reprocover echter de boeken neer. De aanvoer van grondstoffen afkomstig van producten die bij vermaling granulaat vormen (en geen poeder) was steeds een moeilijkheid. Bij het finaliseren van dit rapport waren echter nog geen verdere detailgegevens bekend over een toekomst voor deze technologie.

Mixt Composites Recyclables⁴² in Frankrijk zet in op terugname en recyclage van SMC en BMC via vergruizing (tot 50 µm) en hergebruik als vulstof in nieuwe composiet-componenten voor

35 <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>

36 <http://www.ecowolfinc.com/home.php>

37 <http://www.filon.co.uk/>

38 <http://www.hambleside-danelaw.co.uk/>

39 <http://www.bre.co.uk/page.jsp?id=707>

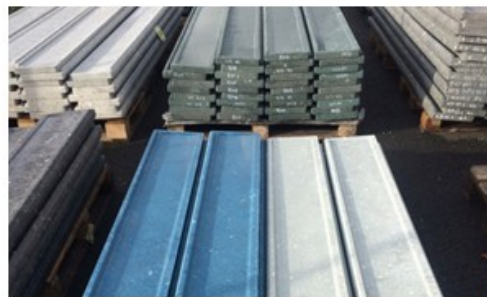
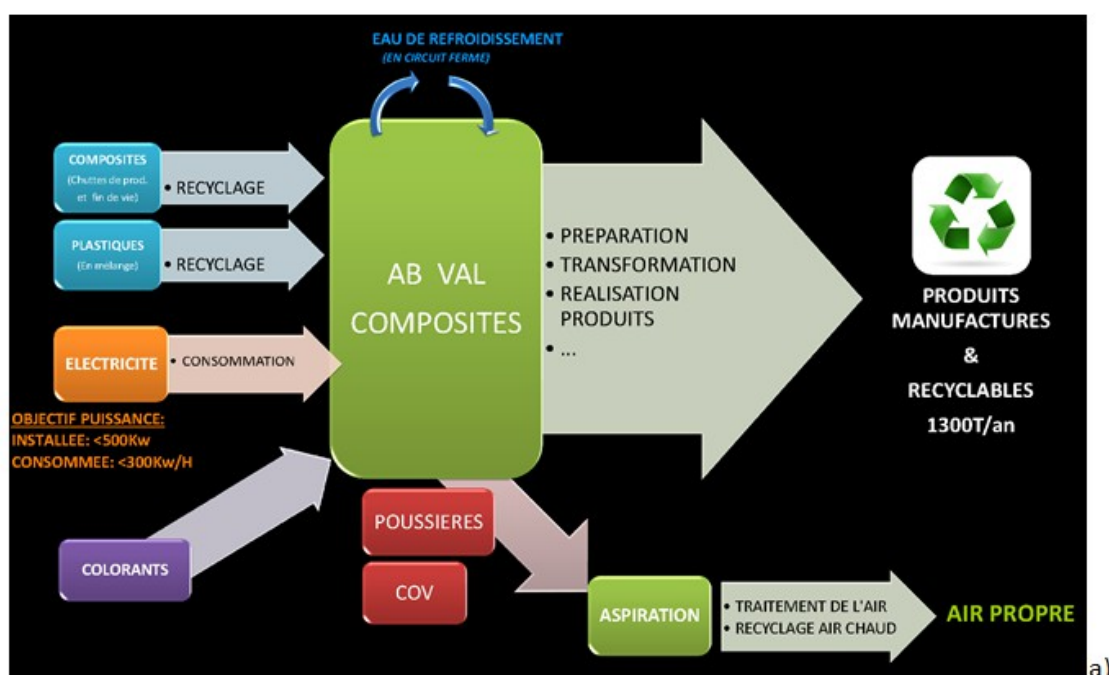
40 <http://www.reprocover.com/>

41 <http://www.3b-fibreglass.com/>

42 <http://www.m-c-r.com/>

automobiel toepassingen. M-C-R recupereert ook langere vezels via grovere vergruizing met het oog op de vervanging van PP vezels in betonnen vloerplaten ter voorkoming van 'cracking' van het cement tijdens het uitharden. Ook voerden zij al onderzoek uit naar het gebruik van gerecycleerde vezels in thermoplastische materialen, echter zonder commercialisatie tot nu toe³⁵.

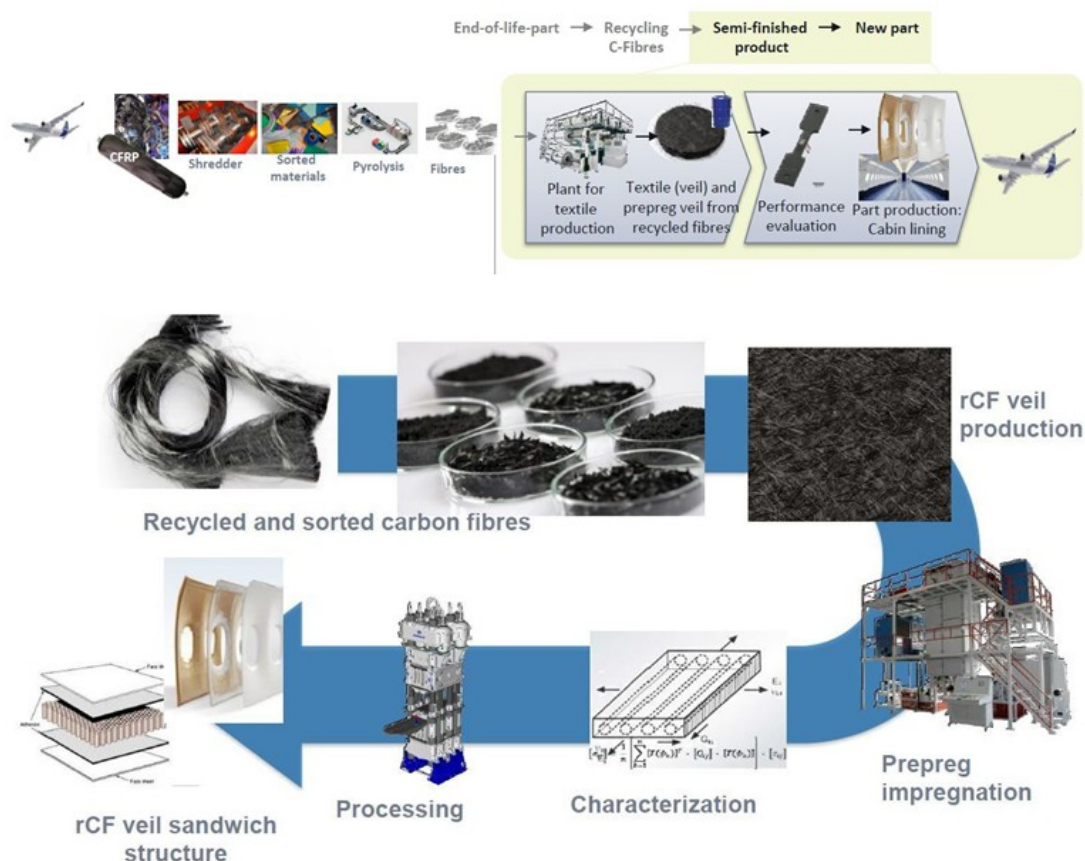
AB-VAL Composites⁴³ (Puceul, W-Frankrijk) recycleert glasvezelversterkt polyester met een capaciteit van 1300 ton afval /jaar. Het proces dat wordt gehanteerd is onduidelijk, maar vereist geen te energie-intensieve fijne vermaling. De composiet fractie wordt gebonden met een thermoplast tot een coherent conglomeraat dat gebruikt kan worden in de productie van lichte, sterke en isolerende producten voor bouwtoepassingen en de inrichting van groene ruimtes (Figuur 37).



Figuur 37: Recyclageproces AB-VAL, FR: (a) proces, (b) input, (c) mogelijke producten

Ook indien voor chemische of thermische recyclage wordt gekozen om de vezels terug te winnen, is shredding (versnipperen) en sortering veelal een eerste stap in het recyclage proces. Figuur 38 geeft weer hoe deze er voor een koolstof vezel composiet kan uitzien.

43 <http://abval.fr/fr/page-daccueil/>



Figuur 38: Recyclage van koolstof vezels volgens volgende stappen: shreddering, sortering, pyrolyse om de vezels te isoleren, productie vezelmat uit gerecycleerde vezels, performantie-testen, product vervaardiging (<http://www.compositesworld.com/blog/post/recycling-carbon-fiber-for-structural-applications>)

4.1.2 Chemische recyclage

Bij chemische recyclage wordt het polymeer opgelost (solvolyse) of afgebroken (bv. via sub-kritische water hydrolyse), waardoor de vezels vrijkomen. Solvolyse en andere chemische recyclagetechnieken zijn echter nog niet erg matuur⁴⁴ (zie Figuur 48). Minstens 6 onderzoeksgroepen houden of hielden zich bezig met onderzoek naar solvolyse, maar tot nu toe bereikte geen van hen een commercialiseerbaar proces⁴⁵. In het EURECOMP project (Exeter University, Plastic Omnium e.a. (2012)) werden enkele chemische recyclagetechnieken bestudeerd naar haalbaarheid. Naast technische en economische hindernissen, is er ook niet altijd een milieuvoordeel in vergelijking met andere verwerkingstechnieken, zoals mechanische recyclage of energierecuperatie. Mogelijk is er wel een milieuvoordeel t.o.v. Pyrolyse⁴⁶.

SINTEF (Noorwegen) heeft samen met Veolia, Nordbaot een chemisch procedé ontwikkeld waarmee glasvezelversterkt polymeer kan gerecycleerd worden⁴⁷, maar het is niet duidelijk of dit proces al gecommmercialiseerd werd⁴⁸.

⁴⁴ Rybicka, J., et al., Technology readiness level assessment of composites recycling technologies, Journal of Cleaner Production (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.104>

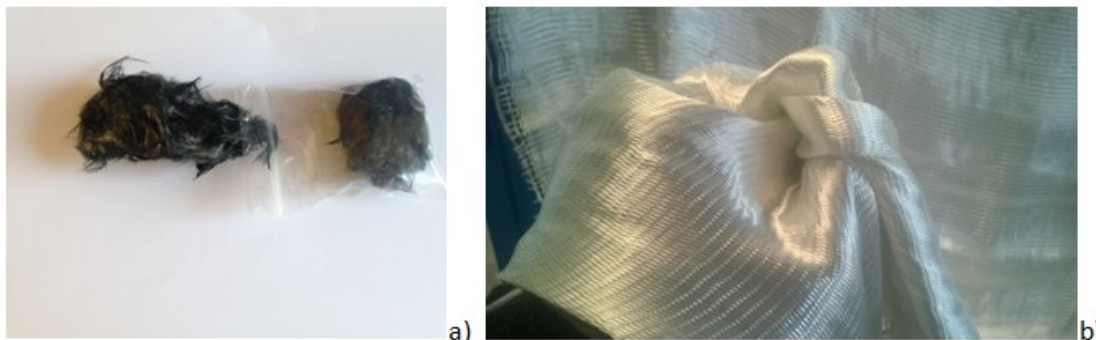
⁴⁵ <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>

⁴⁶ http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201301/20130116_145654_17343_EURECOMP_FinalSummaryReport_Sep2012.pdf

⁴⁷ Guido Machiels, Tijdschrift Varen juni 2015

⁴⁸ <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>

RYMYC is een startup uit Italië die inzet op de recuperatie van vezels en matten. Speciaal aan hun proces is dat de vezels kunnen worden teruggewonnen zonder vezelverkorting, wat de toepassingsmogelijkheden verbreedt (Figuur 39). Het proces zelf is niet vrijgegeven, maar vermoedelijk gaat het om een chemisch proces waarbij het matrixmateriaal wordt opgelost. Zij slagen er in om de vezels in een zeer zuivere toestand terug te winnen (slechts 0.5% residueel hars). Het Italiaanse XENIA zet deze gerecupereerde vezels opnieuw in voor composiet toepassingen (masterbatches voor de compounding industrie, voor spuitgiettoepassingen).



Figuur 39: RYMYC (IT) recycleert vezels (a) en matten (b)

4.1.3 Thermische recyclage

Verbranding van GFRP is weinig interessant, aangezien 50-70% van het materiaal (de glasvezelfractie) van minerale oorsprong is en als bodemas achterblijft. Toch worden grote hoeveelheden EoL composieten via deze weg verwerkt. Het grootste gedeelte van de GFRP dat via het gemengd bedrijfsafval ingezameld wordt, zal via deze weg verwerkt worden. Zo ook in Frankrijk waar het bedrijf 'Les recycleurs Breton' in 2013 zowat 300 boten (GRP) heeft vernietigd. Ze plannen jaarlijks 1700 eenheden⁴⁹. Hun activiteiten spitsen zich toe op het shredden en sorteren van de fracties⁵⁰.

Co-verwerking in een cementoven wordt door de European Cement Association (CEMBUREAU) vooruit geschoven als de beste optie om glasvezelversterkte thermoharders te recyclen⁵¹.

Bij co-verwerking in een cementoven worden alle componenten binnen het composiet materiaal benut: de matrix wordt energetisch gevaloriseerd als vervanger voor fossiele brandstoffen (ca. 12 MJ/kg afval⁵²), terwijl de glasvezels (en de eventuele vulstoffen- veelal calcium carbonaat) geïncorporeerd worden in het cement als vulmateriaal. Er is sprake van 'materiaalhergebruik' tot 70% en 'energieterugwinning tot 30% (de organische fractie)⁵³. Hierdoor is de waarde van het composiet materiaal echter verlaagd tot de waarde van calcium carbonaat (zie eerder), waardoor de route niet altijd economisch interessant is zolang storten een optie blijft⁵⁴. Deze route wordt in België toegepast voor naar schatting 2000 tot 3000 ton composietafval dat als afzonderlijke fractie wordt ingezameld.

Deze route is echter niet geschikt voor CFRP aangezien deze geen minerale componenten bevatten; volledige calorische valorisatie is hierbij dan wel een optie⁵⁵.

⁴⁹ Guido Machiels, Tijdschrift Varen juni 2015

⁵⁰ <http://www.recycleurs-bretons.fr/actualites/61-les-recycleurs-bretons-et-nautisme-en-bretagne-un-partenariat-unique-en-france.html>

⁵¹ EuCIA, 2011. Position paper. Online beschikbaar op: http://www.avk-tv.de/files/20131125_industry_position_paper_on_recycling_2011_3.pdf

⁵² <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>

⁵³ Kema MJA Composieten Recycling 2010

⁵⁴ <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>

⁵⁵ UK Environmental scientist. https://www.the-ies.org/sites/default/files/journals/ES_March2015_new-materials.pdf

Andere thermische recyclagetechnieken, specifiek bedoeld voor terugwinning van de vezels zijn het wervelbed proces en pyrolyse. In het wervelbed proces wordt het composiet materiaal in een zandbed geleid, dat met stoom of hete lucht in een “fluidised” toestand werd gebracht. Het polymeer ontbindt en de zuivere vezels en vulmaterialen komen vrij uit hun matrix. Deze worden vervolgens door middel van de gasstroom weggeleid en opgevangen (Figuur 40). Deze techniek wordt nog niet als matuur ingeschat⁵⁶ (zie Figuur 48).

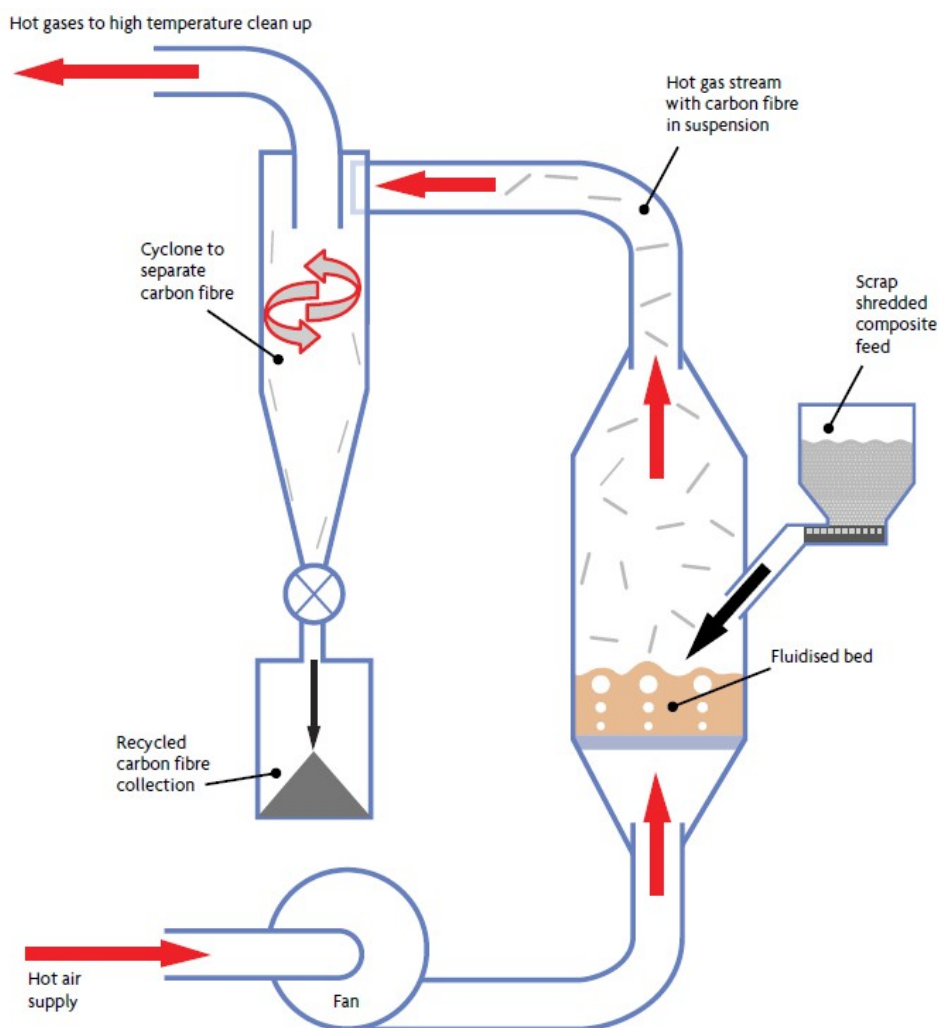


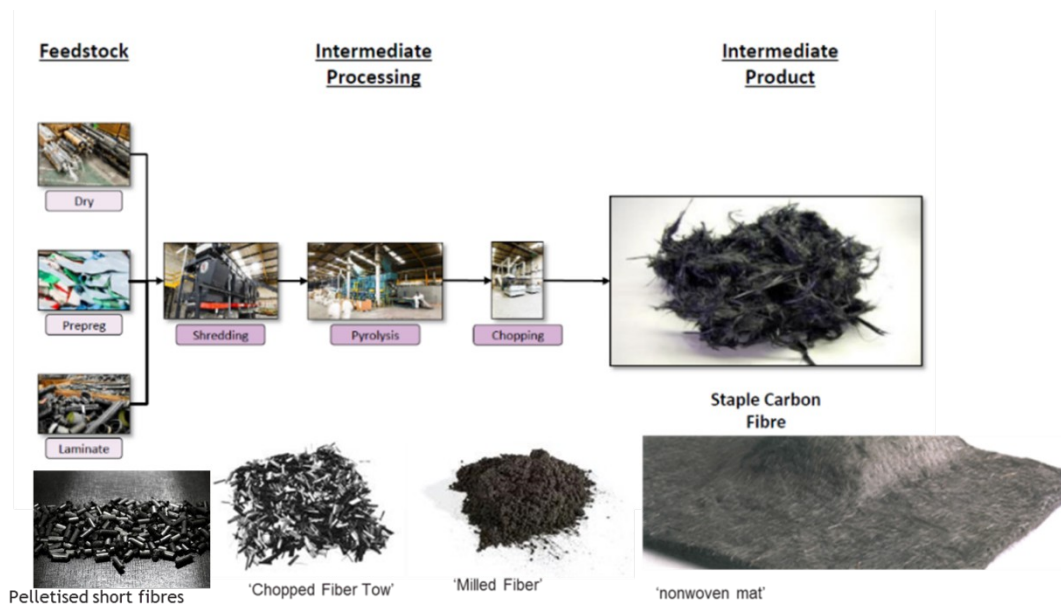
Figure 2. Fluidised bed process. (Courtesy of Professor Steve Pickering, University of Nottingham).

Figuur 40: Wervelbed proces

Bij pyrolyse wordt het polymeer hars in een zuurstofarme (of zuurstof-vrije) omgeving afgebrand of ontbonden, waardoor de zuivere vezels geïsoleerd kunnen worden.

ELG (UK) recycleert koolstofvezels tot een reeks halffabricaten, waaronder gepelletiseerde vezels, korte vezels, vermalen vezels en non-woven matten (Figuur 41). Echter, de uitdaging op vlak van koolstofvezels is het bekomen van voldoende afvalvolumes om recyclage economisch haalbaar te maken. Centralisatie van afvalstromen is nodig.

⁵⁶ Rybicka, J., et al., Technology readiness level assessment of composites recycling technologies, Journal of Cleaner Production (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.104>



Figuur 41: Recyclage van koolstofvezels (ELG- UK)

Ook in België is een bedrijf actief in het recyclen van carbonvezels. Procotex Corporation verwerkt jaarlijks 1500 ton droog afval, voornamelijk afkomstig van koolstofweefsels en -filamenten. Via een pyrolysetechniek, gevolgd door een vermaaltechniek, worden vezels in verschillende lengtes aangeboden (70µ-300µ). Zij kunnen ook precisie en random snijden (0.25mm-100mm). Bovendien beschikt Procotex over de technologie om filamenten een nieuwe sizing te geven, zodat deze compatibel worden met bijvoorbeeld PU of PA. De korte vezels vinden hun toepassing in de compoundingindustrie (thermoplast), evenals in coatings (thermoharder), beton en papierindustrie.



Figuur 42: Recyclage van koolstofvezels (Procotex-BE)

4.1.4 Gebruik van gerecycleerd materiaal in producten

De gebruikte productietechniek heeft geen invloed op de mogelijkheid om een bepaald onderdeel te recyclen, wel is het zo dat het recyclaat van productietechnieken met lange vezels hoogwaardiger kan zijn dan het recyclaat van productietechnieken met korte vezels. Factoren die het gebruik van recyclaat beïnvloeden zijn de zuiverheid, het type vezel, de vezellengte van het recyclaat, de kostprijs,...

Uit de verkregen informatie kunnen we opmaken dat gerecycleerde koolstof vezels ca. 30% minder kosten dan virgin, maar hebben 10-20% minder treksterkte. Vezelrecycalaat wordt daardoor in realiteit hoofdzakelijk gebruikt bij productietechnieken voor korte vezels, en in het bijzonder bij BMS/SMC en hand lay-up (veelal voor iets laagwaardigere toepassingen).

Een aftoetsing van de potentiële inzetbaarheid van recycalaat in thermohardende composieten, ingeschat op basis van vezellengtes, wordt weergegeven in Tabel 11. Zo zijn bijvoorbeeld hand lay-up processen flexibeler om kortere gerecycleerde vezels in te brengen dan continue processen, zoals pultrusie. Het vezeltype en de beschikbare recyclagetechnologie spelen bovendien een rol, naast economische beperkingen.

Tabel 11: Eerste indicatie van de invloed van de gebruikte productietechniek op het potentieel om recycalaat in te zetten (thermohardende composieten)

	Potentieel om recycalaat (vezel) te gebruiken
Spray Layup/ Hand Layup	++
Prepreg Layup	-
Vacuüm infusie	+
RTM (-Light)	+
	++ RTM-light
SMC/BMC	++
RIM (reaction injection moulding)	+
Pultrusie	-
Filament winding	-

— Gerecycleerde glasvezels

Voor wat betreft de glasvezelfracties (als deze afzonderlijk ingezameld kan worden) is Neo-Eco recycling in Frankrijk actief. Het bedrijf heeft de eerste stappen gezet om niet vervuild glasvezel afval te valoriseren. Ze zouden beschikken over een jaarlijkse stroom van 10 kton glasvezel per jaar (Figuur 43).



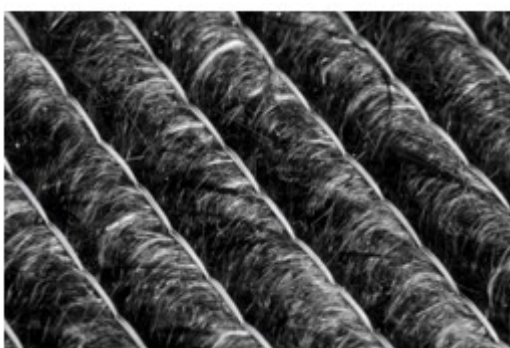
Figuur 43: Recyclage van glasvezels (Neo-Eco)

— **Gerecycleerde koolstofvezels**

Toepassingen van gerecycleerde koolstofvezels situeren zich op vlak van versterking in betontoepassingen en de compounding industrie (het aanmaken van masterbatches voor spuitgiettoepassingen) (Figuur 44).



Figuur 44: Compounding industrie: maken van master batches



Figuur 45: BMW i3: dak uit gerecycleerde koolstofvezel (recyclage door het Engels bedrijf SGL Group)

Ook in de automobielsector is er in toenemende mate interesse in gerecycleerde koolstofvezels, voor toepassingen waar de kortere versterkingsvezels volstaan. Bij de BMW i voertuigen bestaat 10% van de koolstofvezelversterkte materialen uit gerecycleerd materiaal. Zo bestaan het dak en de achterzetels van de BMW i3 uit gerecycleerde koolstofvezel, nonwovens geproduceerd met de RTM techniek (Figuur 45). Dit draagt bij aan het groene imago van deze elektrische wagen.

Ook in het domein van de spuitgiettoepassingen worden gerecycleerde koolstofvezels ingezet, bv. bij Tejin (China) en BMW (Figuur 46 en Figuur 47).

In de toekomst zal de productie van treinbielsen een mogelijke groeimarkt worden voor de toepassing van gerecycleerd GFRP, gezien het uitfaseren van de houten treinbielsen in Europa vanaf 2018³⁵.



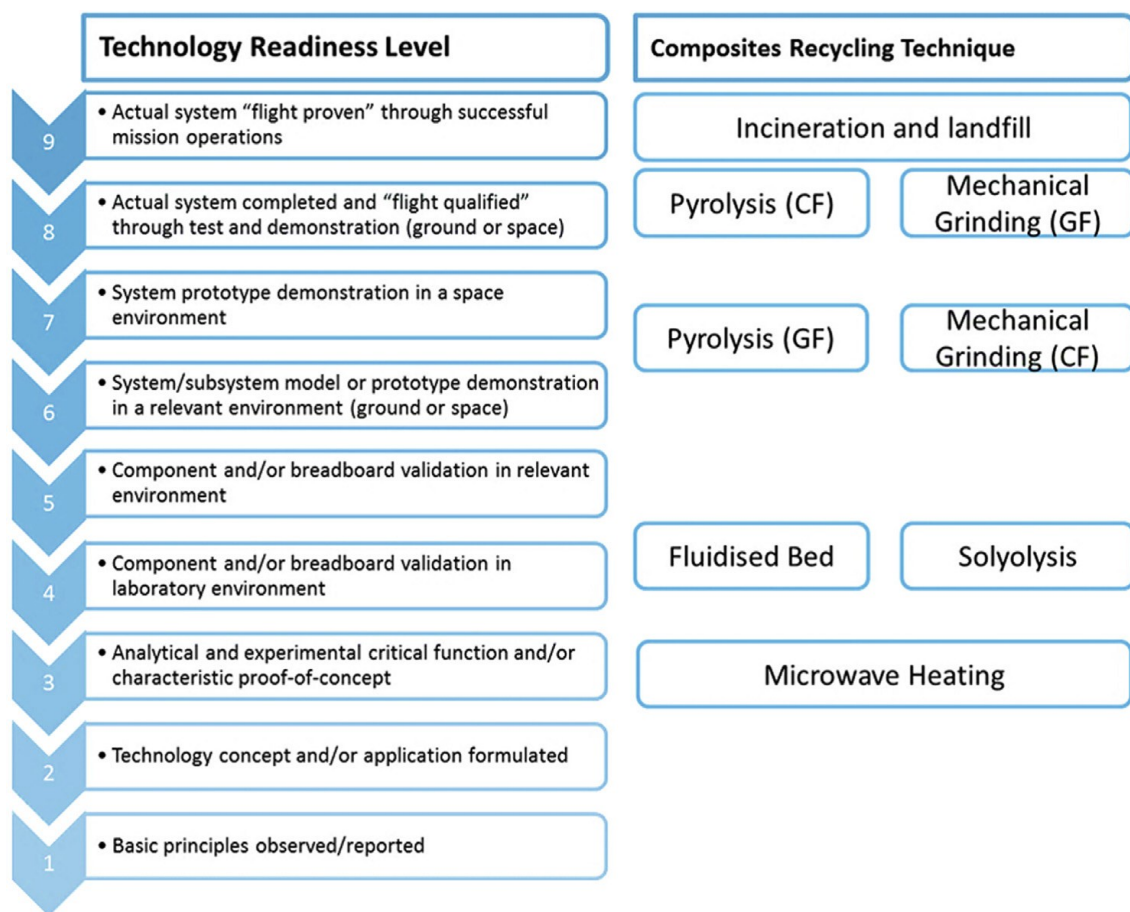
Figuur 46: Tejin (China): Onderdelen op basis van secundaire carbonvezel, geschikt voor compression moulding of spuitgieten



Figuur 47: Midden console van een Mini Clubman, een spuitgietonderdeel gebaseerd op secundaire carbonvezel en PA66 (BMW)

4.1.5 Stand van het onderzoek

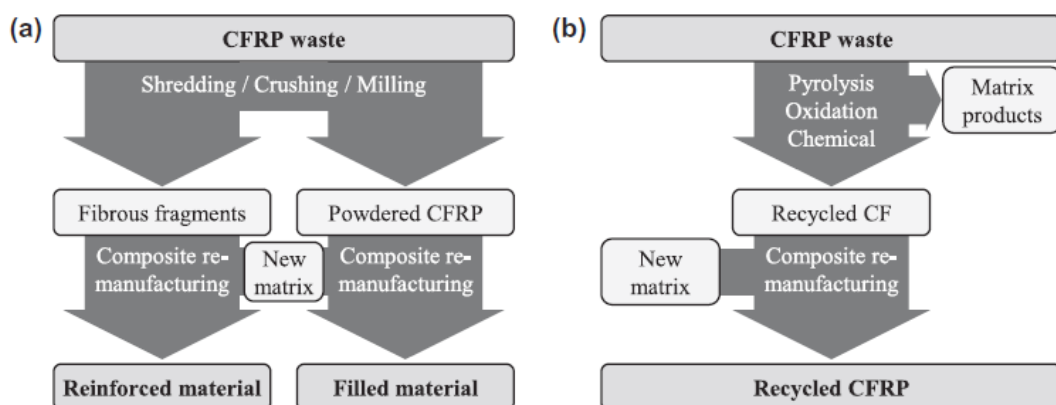
Welke technologieën voor de verwerking van composietafval matuur zijn en ook in de praktijk geëxploiteerd worden, wordt weergegeven in Figuur 48. **Technology Readiness Levels (TRL)** zijn een methode om de maturiteit van technologieën in te schatten, gebaseerd op het technologieconcept, de nodige hulpmiddelen en infrastructuur en de mate waarin de technologie al succesvol werd gedemonstreerd. Het TRL-niveau wordt weergegeven op een schaal van 1 tot 9, waarbij 9 de meest mature technologie vertegenwoordigt.



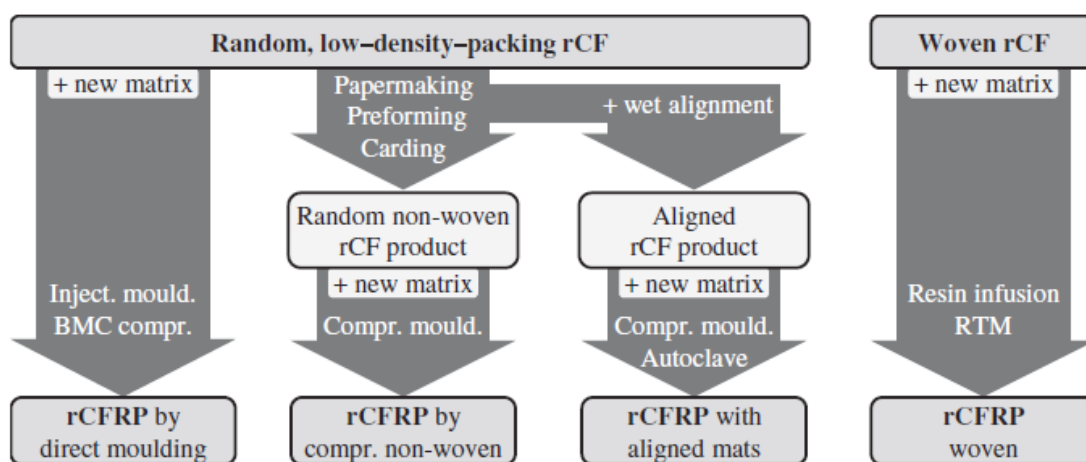
Figuur 48: TRL niveau van de verschillende recyclage technologieën 2015 (Bron: Cranfield University (UK) & University of Birmingham (UK))

Zoals Figuur 48 toont, situeren de onderzoekspistes voor de recyclage van glasvezelversterkte composieten zich voornamelijk op vlak van mechanische recyclage, met het oog op het produceren van vulstof ter vervanging van calciumcarbonaat, en op vlak van vezelrecuperatie via pyrolyse (thermisch proces). Wat betreft de recyclage van koolstofvezelversterkte composieten, wordt voornamelijk onderzoek verricht rond vezelrecuperatie, via pyrolyse (thermisch proces) of solvolyse (chemisch proces) (Figuur 49 en Figuur 50)⁵⁷.

57 Pimenta S, Pinho ST, 2011, Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook, *WASTE MANAGEMENT*, Vol: 31, Pages: 378-392, ISSN: 0956-053X. Bron cijfers: Boeing



Figuur 49: Belangrijkste technologieën voor CFRP recycling: (a) mechanische recyclage, (b) vezel terugwinning

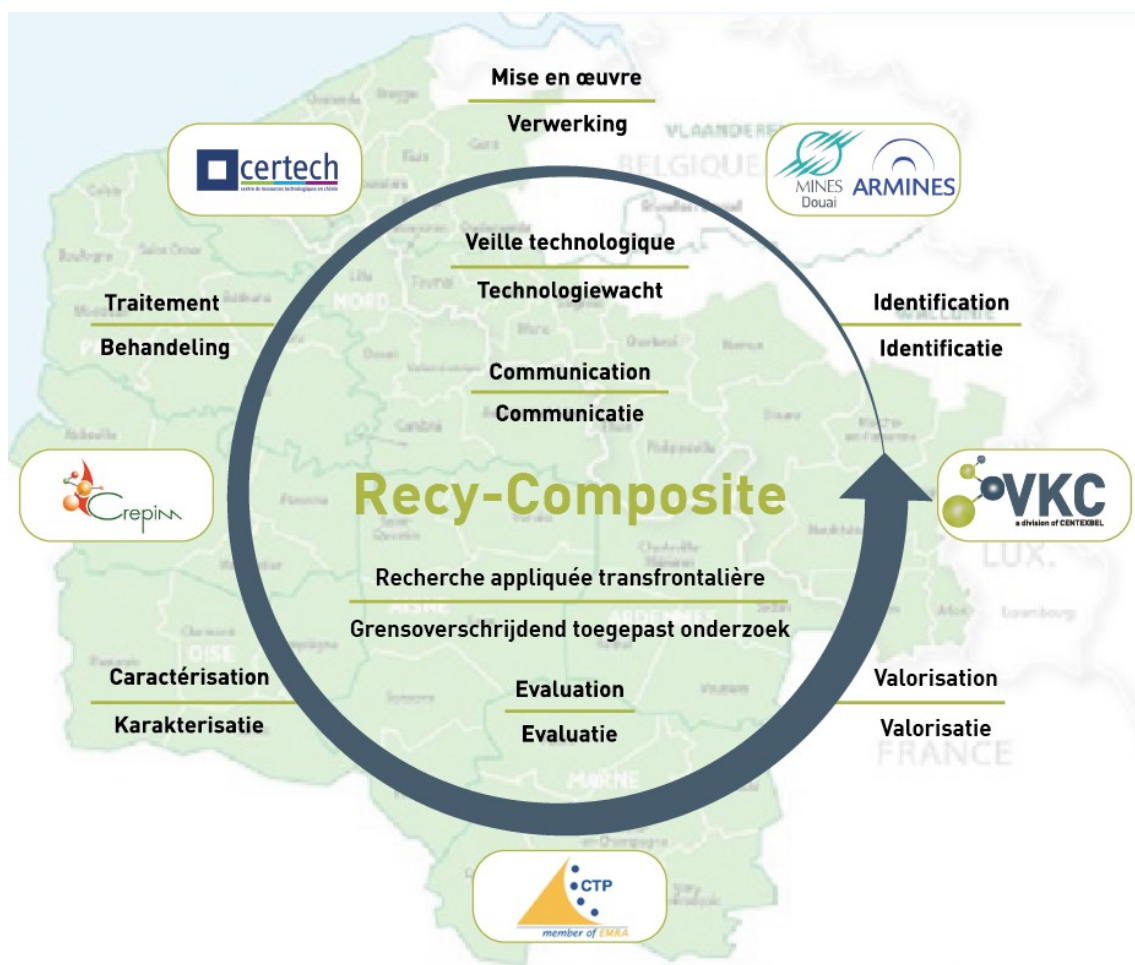


Figuur 50: Remanufacturing van rCFRP

— Onderzoeksprojecten

Het Interreg-project Recy-Composite is gestart op 1 april 2016. Binnen dit project zullen de technische mogelijkheden bekeken worden rond afval van vezelversterkte materialen. Dit kan zowel voor thermoplastische als voor thermohardende materialen. Binnen het onderzoeksconsortium wordt voor het deel thermohardende composieten naar mechanische recyclage gekeken, maar ook de pyrolyse/solvolyse zal beter bekeken worden. Dit 4 jaar lopende project groepeerde een vijftal partners die elke hun eigen aanvullende competenties hebben (verkleinen, compounceren, verwerken, karakteriseren, chemisch verwerken, ...) (Figuur 51).

Het merendeel van de lopende onderzoeken die in het kader van het indienen van dit Interreg project zijn bekeken beperken zich tot het toevoegen van recyclaat als additief. Die toevoeging kan zowel op vezel niveau (versterking van de matrix) of als vulstof (drukken van de prijs).



Figuur 51: Interreg project Recy-Composite

Cresim is een piloot project dat koolstofvezel structuren produceert op basis van gerecycleerde koolstof vezel (Figuur 52). Meer dan 10 verschillende onderdelen werden reeds ontwikkeld: o.a. satellietshotels voor communicatiedoeleinden, sportartikelen zoals skateboards, onderdelen voor Duitse auto's en Japanse fietsen en een hol onderdeel voor de arm van een verpakkingsrobot die aan zeer hoge snelheid werkt⁵⁸.

⁵⁸<http://www.compositesworld.com/news/cannon-gives-update-on-recycled-carbon-fiber-project>



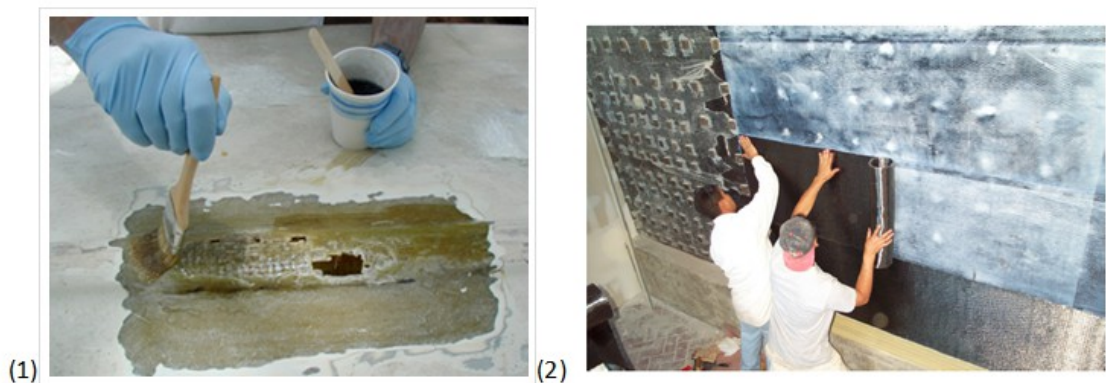
Figuur 52: Cresim project (productie eiland bij Cannon Afros R&D Department in Caronno Pertusella, IT)

5 Verlengen van de gebruiksfase voor thermohardende composiet materialen

Om de gebruiksfase van het product te verlengen, is onderhoud en herstelling nodig. Na afdanking van het product voor zijn hoofdgebruik, kan er al dan niet een hergebruiksfase volgen, waarbij het product voor dezelfde of een andere toepassing wordt hergebruikt. Om het product aan te passen aan de nieuwe toepassing, kan herwerking noodzakelijk zijn.

5.1 Herstelling

Het herstellen van composietconstructies bestaat er meestal uit om de beschadigde delen te verwijderen en nieuwe composietlagen op te lamineren (via hand lay-up of vacuüm technieken). Vaak kan dit in-situ gebeuren. Composiet materialen zijn hierdoor zelfs gemakkelijker te repareren dan traditionele materialen. Wel kan de reparatie ertoe leiden dat de sterkte-eigenschappen van de constructie verminderen, wat vooral van belang is bij constructies die zwaar belast worden. Soms worden voor de reparatie of versterking van traditionele civiele constructies zelfs composietmaterialen gebruikt⁵⁹ (Figuur 53).



Figuur 53: (1) *Herstelling van GFRP via hand lay-up* (http://www.fibreglast.com/product/fiberglass-repair-composite-repair/Learning_Center) (2) *Versterking van een betonnen 'shear wall' met koolstofvezelversterkt composiet* (bron: *Composieten, basiskennis*)

Herstelling wordt momenteel veelal toegepast voor hoogwaardige producten en investeringsgoederen, zoals industriële installaties en bepaalde hoogwaardige sportartikelen.

5.1.1 Enkele voorbeelden

Figuur 54 toont de herstelling van een tankuitlaat uit GFRP. De oude uitlaat wordt eerst uit de tank gesneden en het gat wordt aangepast aan het formaat van de nieuwe uitlaat. De nieuwe, op maat gemaakte, uitlaat wordt vervolgens in de tank gelamineerd met composietlagen zodat hij een integraal onderdeel uitmaakt van de tankstructuur. Ten slotte wordt de buitenkant geschuurd en opnieuw gecoat.

⁵⁹ Composieten, basiskennis



Figuur 54: Herstelling van een tankuitlaat (<http://www.armorshieldlining.com/fiberglass-tank-nozzle-repair.html>)

Figuur 55 toont de reparatie van de romp van vaartuigen die beschadigd werden door botsingen, schuren of vochtinsijpeling. Scheuren, schuurplekken en zelfs grotere beschadigingen kunnen via hand lay-up worden gerepareerd.



Figuur 55: Reparatie van boten (http://www.bluebird-electric.net/boat_repairs_mobile_grp_laminating_service.htm)

Beschadigde frames en (fiets)wielen uit koolstofvezelversterkte materialen kunnen eveneens worden hersteld en opnieuw gecoat, geschilderd en bestickerd zodat niets meer te zien is van

de oorspronkelijke schade. Typisch gebeurt dit in vele verschillende kleine ateliers en op kleine schaal. De producteigenschappen worden waarschijnlijk wel negatief beïnvloed door dit type van herstelling.

Herstellingen aan windmolens gebeuren, maar in België zijn momenteel geen bedrijven die dergelijke herstellingen uitvoeren. Op dit moment worden alle windmolens in België via een service contract van de (buitenlandse, vaak Franse) leverancier onderhouden. Bij de services wordt er soms wel geopteerd om de wieken te demonteren en de herstelling op de grond uit te voeren (voornamelijk bij grotere beschadigingen). In het kader van de fabrieken voor de toekomst (blue energy) leefde het idee bij de VDAB om een cursus in te richten voor dergelijke herstellingen (veiligheid bij werken op grote hoogte, praktische kennis van composiet herstellingen, enz.), maar doordat er geen leveranciers in België zitten en de buitenlandse leveranciers hun eigen personeel en service contract hebben, is er geen interesse meer voor dergelijke cursussen in België⁶⁰.

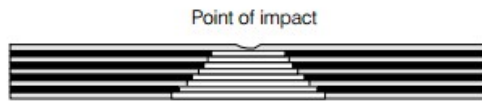
5.1.2 Technieken

De meeste schade gevallen bij composietonderdelen ontstaan door een impact bij lage of hoge snelheid. Bij metalen wordt de energie gedissipeerd door elastische en plastische vervorming, en behoudt de structuur grotendeels zijn structurele eigenschappen. Bij composiet onderdelen kan dit anders zijn. Schade aan een composietonderdeel kan niet altijd met het blote oog waargenomen worden. De schade kan beperkt zijn aan het oppervlak, en meer uitgesproken in het materiaal zelf zonder dat dit zichtbaar is (Figuur 56).

Speciale NDT-technieken (niet- destructieve testen) bestaan voor het opsporen van schade. Sommige van deze technieken kunnen ook zonder dure apparatuur uitgevoerd worden. Deze bestaan er dan in dat er met een hamertje op het voorwerp wordt getikt, afhankelijk van het geproduceerde geluid kan er dan afgeleid worden of er al-dan-niet een probleem is.

⁶⁰ Communicatie Servion (beheerder windmolenpark), via VKC

Delamination following impact on a monolithic laminate

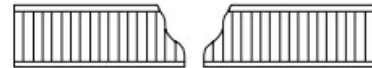


Underlying damage can extend to a much greater extent in laminate structures.

Dents in Sandwich Structure



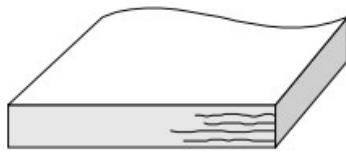
Puncture Damage in a Sandwich Structure



Both skins may be damaged.

Laminate Splitting

The damage does not extend through the full length of the part. The effects on the mechanical performance depend on the length of split relative to the component thickness.



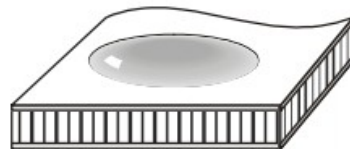
Bolt Hole Damage

The damage could be elongation of the hole causing laminate splitting, or damage to the upper plies.



Heat Damage

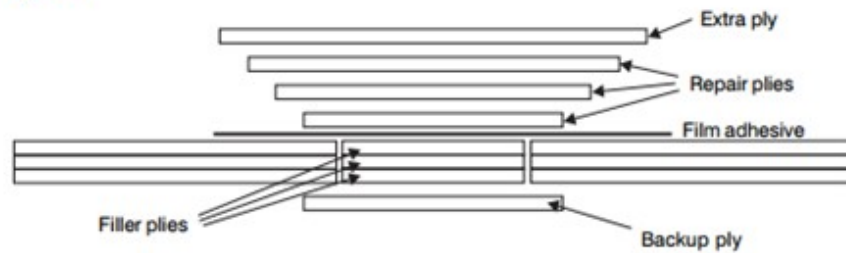
A local fracture with separation of surface plies. Its effect on the mechanical performance depends on the thickness of the part.



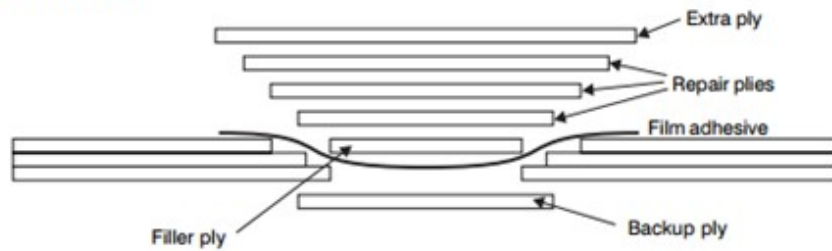
Figuur 56: Types van schade (http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Composite_Repair.pdf)

Indien er defecten worden vastgesteld, kunnen deze gerepareerd worden. Afhankelijk van het toepassingsgebied worden er speciale reparatietechnieken toegepast. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen monolitische laminaten en laminaten met een kern, al-dan-niet enkel of dubbel gekromd. Hieronder enkele voorbeelden:

1. Patch repair



2. Step sanded repair

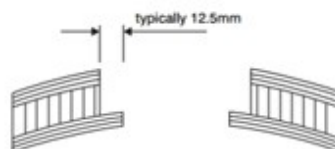


3. Double sided repair

1. Puncture damage



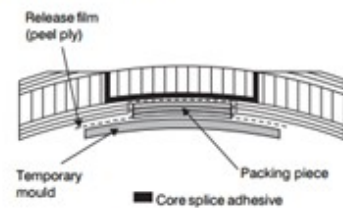
2. Remove damage



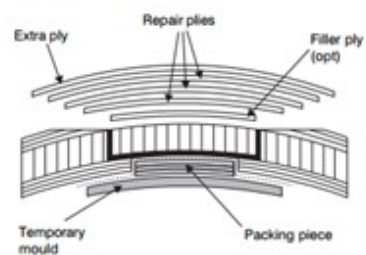
3. Taper sand



4. Bond new honeycomb



5. Repair first side



6. Repair second side



Figuur 57: Reparatietechnieken (http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Composite_Repair.pdf)

5.2 Her-manufacturing

Het herwerken van composietmaterialen voor hergebruik in nieuwe toepassingen wordt geïllustreerd door een project van 2012 Architecten in Rotterdam. Zij ontworpen een speeltuin op basis van afgedankte rotorbladen van windmolens. Ondanks deze mooie toepassing van wegwerpmaterialen, bleek de constructie van een dergelijke speeltuin niet goedkoper dan een conventionele speeltuin (Figuur 58).

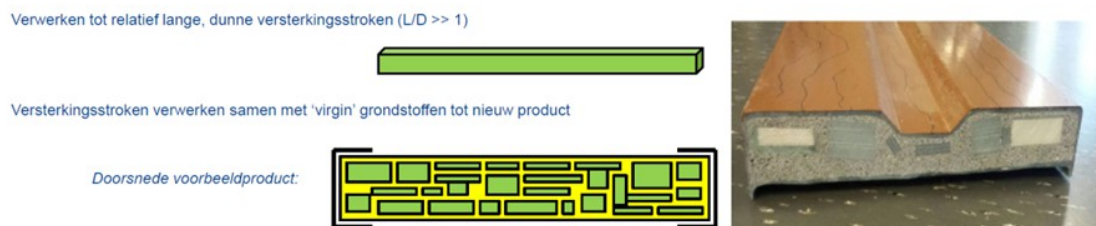


Figuur 58: Wikado speeltuin in Rotterdam, gemaakt uit afgedankte rotorbladen van windmolens

(<http://www.spatialagency.net/database/how/appropriation/2012.architecten>)

Een andere vorm van herwerking en hergebruik van onderdelen is de inzet van gerecupereerde stukken composiet (bv. van windmolenbladen) als versterkingsstroken in nieuwe composietpanelen (Figuur 59). De Hogeschool Windesheim (NL) doet onderzoek naar deze toepassing ter vervanging van hardhout⁶¹.

61 Ten Busschen A. , 2016. Hergebruik van end-of-life thermoharde composietproducten. VKCN –SEMINAR Recycling van composieten: Probleem, kans of al opgelost? 16 maart 2016, Zwolle



Figuur 59: Hergebruik van stroken gerecupereerd composietmateriaal tot nieuwe producten (Hogeschool Windesheim)

Er is een bedrijf dat epoxy-geïmpregneerd plaatmateriaal ('high strength board') produceert, waarbij afval uit de productie van windmolenbladen wordt gebruikt⁶². Zij beweren dat het gebruik van de gerecycleerde glasvezels (tot 70% vezelinhoud) zorgt dat de plaat 90% minder milieu-impact heeft dan plaatmaterialen uit primaire grondstoffen. Het plaatmateriaal kan gebruikt worden in allerlei bouwtoepassingen, in de landbouw (bv. onderverdelingen in stallen) en in de transportindustrie (Figuur 60).



Figuur 60: Plaatmateriaal op basis van gerecycleerde glasvezels

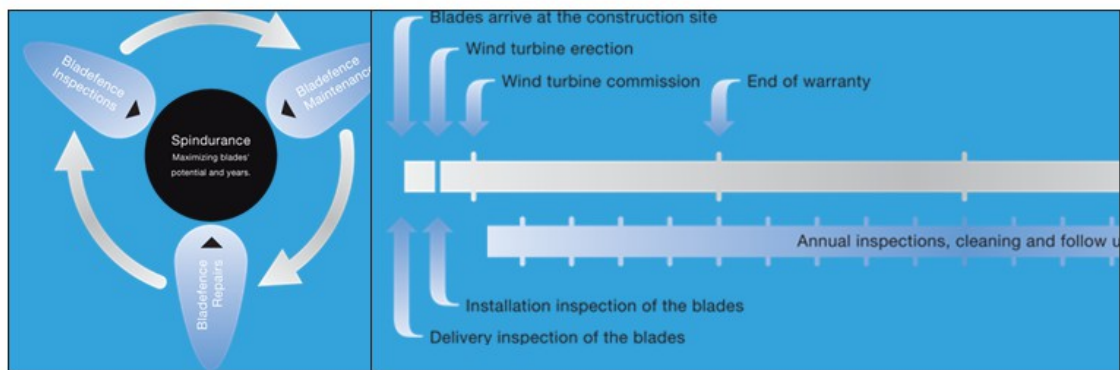
5.3 Duurzaam design – nieuwe businessmodellen

In het domein van de windenergie zijn er voorbeelden beschikbaar van businessmodellen die gebaseerd zijn op onderhoud en herstelling van composietmaterialen, zoals servicecontracten voor onderhoud, monitoring, inspectie en herstelling van windmolenbladen on-site, bijvoorbeeld via de inzet van drones^{63, 64} (Figuur 61, 62 en 63).

⁶² <https://www.materialsampleshop.com/products/glass-fibre-board>

⁶³ <http://blog.sirris.be/blog/more-significant-role-drones-wind-turbine-inspections>

⁶⁴ <http://www.offshorewind.biz/2015/10/07/drones-becoming-very-important-in-wind-turbine-inspections/>



Figuur 61: Inspectie, onderhoud en herstelling als dienst (<http://www.bladefence.com/services/spindurance>)



Figuur 62: Inzet van drones voor inspectie van windmolens
(<http://www.offshorewind.biz/2015/10/07/drones-becoming-very-important-in-wind-turbine-inspections/>)

Blade condition monitoring system BLADEcontrol



BLADEcontrol continuously monitors the condition of rotor blades to detect early signs of damage to the blades and prevent greater problems. Blade lifetime is thereby extended significantly.

The BLADEcontrol Ice Detector detects a preset degree of ice accumulation on the rotor blades - and most importantly, when the danger has passed. The advantage: It is thus possible to automatically restart the wind turbine at any time, day or night.

Figuur 63: Monitoring systemen om schade aan windmolens snel te detecteren
(<http://www.woelfel.de/en/products/wind-energy/shmblade-iddblade/>)

6 Recyclage en hergebruik van thermohardende composieten: wat is het potentieel voor België?

6.1 Te verwachten afvalvolumes en recyclagepotentieel

Voor 2015 werd geschat dat de hoeveelheid composietafval in de EU 251.000 ton EoL-afval en 53.000 ton productieafval zal bedragen⁶⁵. In België zijn de te verwachten afvalvolumes eerder beperkt: zo'n **4000 ton productie-afval** en zo'n **6000 ton EoL-afval** kwamen vrij in 2015. In de toekomst zullen deze volumes waarschijnlijk geleidelijk aan toenemen.

Het merendeel van de EoL-afvalstromen wordt op dit ogenblik niet selectief ingezameld, maar komt terecht in het restafval of bij het grof vuil. Ook een aanzienlijk deel van het productie-afval (voornamelijk vanuit kleinere bedrijven) wordt momenteel niet gescheiden ingezameld, maar via het gemengd bedrijfsafval afgevoerd. Hierdoor wordt de eventuele recyclage van de composietmaterialen uit deze afvalstromen fel bemoeilijkt. Anderzijds is de selectieve inzameling van deze stromen logistiek weinig interessant, omdat het vaak om relatief kleine hoeveelheden gaat die bovendien zeer divers kunnen zijn en zeer verspreid kunnen vrijkomen bij kleine bedrijven, herstellateliers en consumenten, waardoor het zowel praktisch als economisch niet haalbaar is om hier aparte containers voor te voorzien. Scheiding bij de bron (bij ontstaan van het afval) kan pas een boost krijgen als er ook economisch rendabele verwerkingsmethodes bestaan.

Afvalstromen met het meeste potentieel voor recyclage zijn **zuivere, homogene stromen** die in relatief grote volumes vrijkomen, zoals productie-afval uit grote bedrijven, EoL-windmolens en EoL-vliegtuigen. In België gaat het hierbij om 2000 tot 3000 ton productieafval op jaarbasis. Daarbij komen in de toekomst (vanaf 2025-2030) mogelijk 2000 tot 3000 ton EoL windmolens per jaar. Hierbij dient wel de kanttekening gemaakt dat deze windmolens typisch onder service-contracten met buitenlandse (meestal Franse) firma's vallen (aangezien er momenteel geen producenten of herstellende van windmolens in België actief zijn). Het is hierdoor dus niet zeker dat de afvalstromen die gepaard gaan met de herstelling en afbraak van deze windmolen effectief op de Belgische markt zullen vrijkomen. Niettemin vormen dergelijke service-contracten wel een goede opportuniteit om homogene afvalstromen goed selectief te kunnen inzamelen, mogelijk ook voor andere productgroepen.

Momenteel wordt een aanzienlijk deel van deze zuivere afvalstromen verwerkt via co-processing in de cementindustrie, waarbij wordt uitgegaan van ca. 70% materiaalrecyclage (grondstofvervanger in cement) en ca. 30% thermische valorisatie (vervanging van fossiele brandstoffen in de oven). Hierbij gaan de specifieke versterkende eigenschappen van de composieten echter verloren.

Composieten die **verwerkt zijn in producten** waarvoor reeds een recyclageroute bestaat (bv. verwerking van ELV's en AEEA), komen typisch in de restfractie van deze recyclageroute terecht en worden ingezet voor energierecuperatie, aangezien de bestaande verwerkingsinstallaties voornamelijk gericht zijn op de recyclage van andere materialen, zoals metalen en thermoplasten. Selectieve ontmanteling of uitsortering van de composieten gebeurt momenteel niet, gezien de kosten van demontage, de beperkte volumes composiet, de grote variabiliteit in aard en voorkomen, de moeilijke identificatie en de beperkte waarde van recyclaat. Door het toenemend gebruik van hoogwaardige materialen (o.a. koolstofvezelversterkte composieten),

⁶⁵ <http://www.mace.manchester.ac.uk/our-research/research-themes/innovative-manufacturing/research-projects/exhume/>

kritische metalen en waardevolle componenten (bv. batterijen) in lichte (elektrische) voertuigen kan het in de toekomst mogelijk wel interessanter worden om voor deze voertuigen andere verwerkingsprocessen op te starten die meer gericht zijn op hoogwaardige materiaal- en componentrecuperatie, met meer nadruk op demontage (om bv. volledige onderdelen te hergebruiken) en minder shreddering. In een dergelijk scenario kan ook de recuperatie van thermohardende composieten uit EoL voertuigen economisch interessanter worden. Voorwaarde is uiteraard dat ook bij het ontwerp van voertuigen rekening wordt gehouden met een vlotte scheiding van de verschillende materialen bij einde-leven, onder meer door een goede identificatie van verschillende materialen, een beperkte variabiliteit in de aard van de gebruikte materialen en een ontwerp dat gericht is op vlotte demontage. Dit vereist uiteraard een betere samenwerking doorheen de hele waardeketen van deze voertuigen.

De relatief beperkte hoeveelheid, de onzekerheid wanneer en waar deze afvalstromen juist zullen vrijkomen en de onzekerheid op de beschikbaarheid van geschikte technologieën, maken dat het zeer risicovol is om voor deze stromen in te zetten op gerichte verwerkingsroutes en specifieke composietrecyclage toepassingen. Wel lijkt het zinvol om te onderzoeken op welke manier deze afvalstromen kunnen worden verwerkt tot (secundaire) materialen en ingezet als alternatieve grondstof in bestaande (of nieuwe) producten en processen.

Op vlak van design voor recyclage en design voor hergebruik of her-manufacturing is het potentieel eerder klein. Composieten worden immers veelal gebruikt in producten met lange levensduur (> 50 jaar), waardoor het zeer moeilijk te voorspellen is waaraan een dergelijk design zou moeten voldoen om in de verre toekomst nuttig te zijn voor hergebruik. Bovendien zit er een zeer lange tijd tussen de inspanningen die geleverd moeten worden voor het design vandaag en de mogelijke (maar zeer onzekere) baten in een verre toekomst.

6.2 Barrières

Functionele recyclage van thermohardende composietmaterialen, d.i. recyclage waarbij de functionaliteit van de materialen zo goed mogelijk behouden blijft, is technisch mogelijk, maar gebeurt in de praktijk weinig aangezien er een reeks barrières zijn die de commercialisatie van deze recyclageprocessen bemoeilijken.

Er zijn nog een aantal **technologische barrières**. Gerecycleerde (koolstof)vezel heeft niet exact dezelfde eigenschappen als vezel uit primair materiaal. De sizing (coating op de vezel) die de hechting met de matrix verzekert is immers niet identiek of ontbrekend. Ook de eigenschappen van de vezel zelf kunnen afhankelijk van het recyclage proces 10 tot 20 % in treksterkte gereduceerd zijn.

De meeste barrières zijn **economisch** van aard. De meeste mechanische en chemische recyclageprocessen zijn te duur in verhouding tot marktwaarde die kan verkregen worden uit het recyclaat. Doordat de meeste processen zorgen voor een significante verkorting van de vezels, kan het recyclaat meestal slechts als vulmiddel worden ingezet (bv. ter vervanging van calciumcarbonaat, marktprijs ca. € 300/ton). Het is dus cruciaal om de oorspronkelijke eigenschappen van de vezels en de matrix zo goed mogelijk te behouden met het oog op een hogere marktwaarde voor het recyclaat. Echter, momenteel ligt de kostprijs van recyclaat blijkbaar nog onvoldoende laag (ca. 20 tot 40% goedkoper dan primaire vezels, afhankelijk van de bron) om bedrijven te overtuigen om op recyclaat over te stappen.

Een tweede economische barrière is het ontbreken van een echte **marktvraag naar recyclaat**. Zelfs indien recyclaat van goede kwaliteit tegen een interessante prijs kan worden geproduceerd, is er terughoudendheid bij klanten. Aangezien composieten typisch worden gebruikt in hoogwaardige toepassingen die zwaar worden belast, zijn er meestal strikte technische eisen en moet de producent verregaande kwaliteitsgaranties kunnen bieden. Ten gevolge van deze productaansprakelijkheid, zijn mogelijke klanten niet geneigd om risico's te nemen door voor recyclaat te kiezen, zelfs al is het goedkoper. Voor bepaalde toepassingen is ook expliciet primair materiaal voorgeschreven in productnormen. In de sector van de

composietmaterialen vormt een 'groen' imago over het algemeen ook geen troef, enkel de kwaliteit, de eigenschappen, en de grondstofprijs zijn bepalend. Uitzonderingen hierop zijn bepaalde nicheproducten, zoals bv. elektrische wagens, waarbij het gebruik van recyclelaat in minder veeleisende componenten wel bijdraagt aan het groene imago (zie voorbeeld BMW i3, computerbehuizingen,...).

Een derde barrière voor de uitbouw van recyclagelijnen is de **grote onzekerheid** op vlak van afvalvolumes die beschikbaar zullen worden. Niet alleen is er weinig betrouwbare/nauwkeurige informatie over de volumes aan composieten in de economie, bovendien is het, onder andere door de internationale markt in composietproducten en de lange levensduur van deze producten, ook zeer onzeker waar en wanneer deze afvalvolumes op de markt zullen komen. Daarnaast zijn de te verwachten volumes in België op korte termijn vrij beperkt, waardoor slechts enkele (of zelfs één) installaties zouden volstaan om alles te verwerken (cfr. AB-VAL heeft één lijn met een recyclagecapaciteit van 1,3 ton per jaar, d.i. de helft van het totale afvalvolume in België vandaag). Zeker voor koolstofvezelversterkte composieten zijn de te verwachten afvalvolumes nog veel beperkter, waardoor een handvol installaties al het afval vanuit heel Europa zouden kunnen verwerken, gesteld dat dit logistiek nog rendabel zou zijn. Op lange termijn zullen deze volumes waarschijnlijk wel toenemen, gezien het toenemende gebruik.

Ten slotte is de **reglementering rond afvalverwerking en -stockage** vaak een ontmoedigende factor, waardoor bedrijven afzien om afvalstromen terug te nemen of in te zamelen om opnieuw als grondstof in te zetten. Deze barrière speelt niet specifiek voor composietafval, maar geldt voor afvalstromen en recyclage in het algemeen. Productiebedrijven willen niet graag als afvalverwerker worden beschouwd, o.w.v. de bijkomende vergunningsvoorwaarden, formaliteiten en lasten die hierbij komen kijken.

6.3 Milieu-impact

De milieuvoordelen van het gebruik van composieten zijn meestal terug te voeren tot hun lage gewicht in verhouding tot hun sterkte. Hierdoor kan bespaard worden op traditionele materialen (bv. staal). Bovendien leidt het lage gewicht vaak tot energiebesparingen tijdens de gebruiksfase (bv. in transportmiddelen).

De productie van de composietvezels zelf vergt echter wel veel energie (voornamelijk bij koolstofvezels), terwijl de matrix meestal een kunststof op basis van aardolie is. Het is mogelijk om composieten, zowel matrix als vezels, van natuurlijke materialen te maken (bamboe, sisal, houtvezels, bio-kunststoffen). Dit heeft echter invloed op de technische eigenschappen van de resulterende composiet. Ook de productiemethode heeft een zekere milieu-impact. Bij het gebruik van open mallen komen er meer vluchtige emissies (VOC's) vrij, terwijl bij gesloten mallen door het grotere aantal hulpstoffen meer afval vrijkomt (bv. vacuümfolie)⁶⁶.

Een semi-kwantitatieve analyse van de milieu-impact (uitgedrukt in millipunten per kilogram) van composietmaterialen kan op basis van data uit tools en databanken zoals Ecolizer, Idemat of Ecoinvent worden ingeschat (Tabel 12).

⁶⁶ Composieten, basiskennis

	Milieu-impact grondstof (Total Recipe method)	Opmerking
Glas vezel	50 mPt (Idemat) 273 mPt (Ecolizer) 272 mPt (Ecoinvent)	Draagt niet bij tot energie recuperatie bij verbranding.
Koolstof vezel	1528 mPt (Idemat) 799 mPt (Ecolizer)	Draagt wel bij tot energie recuperatie bij verbranding (+/- 32 à 33,6 MJ/kg). (bron: CES selector)
Aramide vezel	1231 mPt	Draagt wel bij tot energie recuperatie bij verbranding (+/- 27,4 à 28,8 MJ/kg). (Bron CES selector)
Bio gebaseerde vezel	90- 110 Mpt (excl. Katoen!) Vlas 385 mPt (Ecolizer) Jute 129 mPt (Ecoinvent)	Draagt wel bij tot energie recuperatie bij verbranding. Katoen : 17 MJ/kg Vlas: 17 à 20 MJ/kg
Polyester matrix	508 mPt (Idemat) 500 mPt (Ecolizer) 378 mPt (Ecoinvent)	Draagt bij tot energie recuperatie bij verbranding. (30 à 31,5 MJ/kg) (bron: CES selector)
Epoxy matrix	711 mPt (Idemat) 711 mPt (Ecolizer) 734 mPt (Ecoinvent)	Draagt bij tot energie recuperatie bij verbranding. (28 à 29,4 MJ/kg) (Bron CES selector)
PUR	472-505 mPt (Idemat) 461 -515 mPt (Ecoinvent)	Draagt bij tot energie recuperatie bij verbranding. (21,8 à 22,9 MJ/kg) (Bron CES selector)

Tabel 12: Eerste inschatting van de milieu-impact van composietmaterialen en hun EoL-verwerking

Hoewel de eco-impact cijfers soms sterk van elkaar kunnen verschillen naar gelang de bron, zijn een paar duidelijke besluiten te trekken:

- De productie van glasvezel (als materiaal) heeft een erg lage milieu-impact die van dezelfde grootteorde is als deze van de bio-gebaseerde materialen.
- De productie van koolstof- en aramidevezels veroorzaakt de grootste milieu-impact (mPt/kg), die ongeveer dubbel zo groot is als de milieu-impact van de productie van de matrix.
- Van de matrixmaterialen heeft PUR een net iets lagere impact dan polyester, dat op zijn beurt een beduidend lagere impact heeft dan epoxy.
- Door de vezel-matrix combinatie van de producten wordt bij GFRP-afval gerekend met een calorische waarde van 12 MJ/kg⁶⁷.

Voor wat betreft de milieu-impact van de recyclagemethoden kunnen uitsluitend ruwe inschattingen gemaakt worden aangezien de meeste recyclage technologieën nog niet erg matuur zijn (zie ook 4.1.5.). Hierdoor is de milieu-impact van deze recyclage technologieën nog niet op betrouwbare wijze te kwantificeren.

De chemische processen vereisen energie en potentieel milieu belastende chemicaliën. Afhankelijk van de energie efficiëntie en de wijze waarop de chemicaliën ingezet worden (open of gesloten kringen, wel of geen recuperatie van de chemicaliën,...) zal de milieu-impact ook sterk verschillen.

De thermische processen hebben een potentieel grote milieu-impact door het grotere energieverbruik. Ook hier kan warmterecuperatie, de aard van de gebruikte energiebron enz. een grote spreiding geven op de milieu-impact van het recyclage proces.

⁶⁷ <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>

De mechanische recyclage heeft wellicht een lager energieverbruik maar heeft dan weer meer indirecte impact door bijvoorbeeld grote slijtage aan machine onderdelen zoals shreddermessen. Ook hier is geen erg betrouwbare kwantificering van te maken.

Voor wat betreft de finale afvalverwerking, verbranding en storten, zijn er alleen algemene data beschikbaar (30 – 60 mPt) die een indicatie geven van de milieu-impact van verbranding met en zonder energierecuperatie.

De milieu-impact van deze EoL verwerkingspistes is daarenboven verschillend voor verschillende composiet materialen. De calorische waarde van de producten, de oplosbaarheid voor solvolyse, de taaiheid bij shredden,... zijn immers afhankelijk van aard en type vezel, de vezel/matrix verhouding, de aard en type van de matrix,... Hierdoor wordt de efficiëntie en dus de milieu-impact van elk van de processen bijkomend beïnvloed.

Samengevat vormt de afvalhiërarchie een goede uitgangsbasis bij de selectie bij de keuze van de afvalbehandeling. (zie ook Figuur 29 in sectie 2.6).

7 Aanbevelingen

Composietmaterialen verschillen van traditionele materialen doordat ze hun waardevolle eigenschappen in belangrijke mate ontleen aan hun fysische structuur en de ordening van de verschillende samenstellende grondstoffen. Composieten kunnen in dat opzicht eerder als 'component' beschouwd worden. Hierdoor vormt hoogwaardige en functionele recyclage (recyclage waarbij de functionaliteit van de oorspronkelijke composiet zo goed mogelijk behouden blijft) van deze materialen een bijzondere uitdaging. Bij thermohardende composieten speelt bovendien nog het bijkomende probleem dat thermohardende kunststoffen niet hersmolten kunnen worden tot nieuwe onderdelen (in tegenstelling tot thermoplasten, die wel tot nieuw granulaat kunnen worden verwerkt). Recyclage van deze materialen gaat dus steeds gepaard met enig verlies in functionaliteit.

Hoogwaardige recyclage van thermohardende composieten is bijgevolg voornamelijk gericht op de recyclage van vezels via thermische of chemische processen en de inzet van granulaten met versterkende eigenschappen (mechanische recyclage, waarbij de versterkende eigenschappen deels behouden blijven en benut worden). Rond chemische en thermische processen gebeurt reeds heel wat onderzoek, maar deze processen zijn meestal nog niet erg matuur. Er zijn in Europa wel enkele startup bedrijven actief op dit vlak.

De mechanische recyclageroute is wel matuur, maar de markt voor dit recyclaat is nauwelijks ontwikkeld. Vaak wordt dit recyclaat eerder laagwaardig ingezet als vulstof (ter vervanging van calciumcarbonaat), waarbij eventuele sterkte-eigenschappen die nog aanwezig zijn uiteindelijk niet of nauwelijks worden benut in de nieuwe toepassing. In dergelijk geval kan men dan ook niet echt spreken van hoogwaardige, en functionele recyclage. Ook co-processing in cementovens is een mature verwerkingsroute, waarbij de matrix energetisch wordt gevaloriseerd en de vezels een structurele functie (vulstof) hebben in de cement. Ook hier gaat de oorspronkelijke functionaliteit deels verloren.

Hoewel er dus mature recyclageroutes voor handen zijn en er heel wat onderzoek plaatsvindt, gebeurt composietrecyclage in de praktijk zeer weinig en komen afvalstromen meestal bij het restafval terecht. De barrières zijn vooral economisch (kosten-baten) en marktgerelateerd (gebrek aan marktvraag voor recyclaat of onvoldoende afzetmarkt binnen de gekende mogelijkheden). Daarnaast speelt de onzekerheid op vlak van plaats en tijdstip van het vrijkomen van voldoende afvalvolumes een belangrijke rol.

Voor bepaalde homogene, zuivere afvalstromen die vermoedelijk wel in significante volumes zullen vrijkomen, is er echter wel potentieel voor hoogwaardige en functionele recyclage. De belangrijkste aanbevelingen om dit potentieel te vergroten en aan te boren zijn hieronder opgelijst. Deze zijn gebaseerd zijn op het gevoerde literatuuronderzoek en de bevraging van de Belgische sector van vezelversterkte composieten⁶⁸.

1. Verbeteren van de afzetmarkt en toepassingen voor recyclaten

Het grootste struikelblok voor recyclage van composieten is het ontbreken van een marktvraag naar recyclaat. Niettemin laten de recente ontwikkelingen op vlak van recyclage toe om hoogwaardige vezels te recupereren aan een lagere kostprijs dan nieuwe vezels. Bovendien kunnen granulaten met gedeeltelijk behoud van versterkende eigenschappen worden geproduceerd. Technisch en economisch is recyclage dus mogelijk, maar de aanvaarding door de sector moet nog groeien. Niettemin zal het voor bepaalde high-performance toepassingen niet realistisch zijn om de kringloop volledig te sluiten. Afvalstromen uit deze toepassingen zullen

⁶⁸ In het VK werd in 2013 een Resource Efficiency Action Plan (REAP) voor de composietsector uitgewerkt in opdracht van Composites UK met als doel om de grondstoffenefficiëntie te verbeteren binnen de sector van de vezelversterkte materialen. De kernpunten uit dit Actieplan werden opgenomen in bijlage.

niet voor dezelfde toepassing kunnen gebruikt worden, en er zal eerder moeten gekeken worden naar herinzet binnen andere producten of sectoren. Zo kan recycalaat worden ingezet voor minder veeleisende toepassingen, bv. als versterkingsmateriaal in andere producten, zoals in vezelversterkt thermoplastisch materiaal. Bij het zoeken naar toepassingsdomeinen is het belangrijk om in te zetten op het ontwikkelen van veerkrachtige afzetroutes, die echter niet exclusief gericht zijn op gerecycleerd composietmateriaal. Gezien de beperkte volumes en variabiliteit en onzekerheid in aanvoer en kwaliteiten, is het immers niet interessant om 'vaste' afvalverwerkingsroutes op te zetten. Wel is er potentieel om bestaande (en nieuwe) productieprocessen zo te ontwerpen dat recyclaten er op een flexibele manier kunnen worden ingezet ter vervanging van primaire grondstoffen. Afhankelijk van het marktaanbod, kan dan worden overgeschakeld op recycalaat, dan wel op primaire grondstoffen.

Bovendien heeft de inzet van recycalaat als alternatieve grondstof een mogelijke invloed op het einde-leven en de recycleerbaarheid van het nieuwe product, in feite het tweede einde-leven van het composietmateriaal. Met het oog op het sluiten van kringlopen op lange termijn, wordt bij recyclagekeuzes van vandaag best ook rekening gehouden met de recyclageopties in de toekomst. Hierbij is het belangrijk om te vermijden dat bestaande kringlopen verstoord of bemoeilijkt worden. Zo kan het bijmengen van composietrecycalaat bij een normaalgezien zuiver (en goed recycleerbaar) materiaal (bv. een bepaalde kunststof of granulaat) op lange termijn problemen veroorzaken bij de volgende recyclagestap. Door de lange levensduur van bepaalde producten, kan deze volgende recyclagestap wel erg ver in de toekomst liggen, wat de afweging niet gemakkelijk maakt.

2. Verbetering van de selectieve inzameling en scheiding van composietafval

Het recyclagepotentieel voor composietmaterialen zit op korte termijn vooral in de selectieve ophaling van gelijksoortig afval binnen een beperkte regio (bv. windturbines, boten, productieafval van grotere bedrijven).

Een selectieve ontmanteling van thermohardende composietonderdelen uit bepaalde producten (bv. voertuigen) kan op langere termijn ook significante volumes materiaal opleveren. Dit vereist echter een betere samenwerking doorheen de waardeketen van deze producten, omdat bij het ontwerp en de productie al rekening moet worden gehouden met een haalbare en vlotte identificatie en ontmanteling van deze onderdelen. De bevordering van product-dienst combinaties, zoals bv. de service-contracten die in de windmolensector al gangbaar zijn, kan hiervoor een sterke stimulans vormen. Dit geldt overigens niet enkel voor de terugwinning van composietmaterialen, maar bij uitbreiding voor alle materialen en in het bijzonder hergebruik of herwerking van volledige componenten. In de meeste gevallen zullen composieten op zich immers niet de economische drijfveer vormen voor het opzetten van dergelijke terugnamesystemen en gerichte afvalverwerking, maar zal het eerder de terugwinning van andere hoogwaardige materialen (bv. metalen en kritische materialen) en volledige onderdelen zijn die gerichte terugname mogelijk economisch interessant zullen maken. De selectieve terugwinning van composieten kan hier dan eveneens deel van uitmaken. Gezien het sterk internationale karakter van de markt voor composieten en hun toepassingen, zal ook internationale samenwerking noodzakelijk zijn om de gewenste evoluties op vlak van productontwerp en de opzet van terugnamesystemen op een effectieve en werkbare manier door te voeren.

Uiteraard hangt de economische haalbaarheid van meer gescheiden inzameling en selectieve ontmanteling of uitsortering van composietmaterialen sterk samen met het uitbouwen van een concrete vraag en afzetmarkt voor het recycalaat (zie aanbeveling 1).

3. Reglementering rond afvaltransport, opslag en verwerking (secundair belang)

Flexibele regelgeving is nodig die de drempel voor bedrijven verlaagt om afvalstromen terug te nemen, op te slaan en te verwerken binnen de productieprocessen. Bedrijven die nu materialen terugnemen uit de vezelversterkte markt worden onmiddellijk gecatalogeerd als "afvalverwerkend bedrijf". Vaak willen bedrijven om die reden alleen al geen producten

terugnemen. Een versoepeling van de regelgeving hierrond, zou sommige bedrijven kunnen aanmoedigen om terugname en eventueel hergebruik/recyclage van goederen te herbekijken.

Bijlage 1: Lijst van tabellen

Tabel 1: Productieprocessen voor thermoharders	25
Tabel 2: Overzicht van productieprocessen in relatie tot gebruikte vezels en matrixmaterialen	28
Tabel 3: Invloed van vezeltype en vezelfractie op de eigenschappen van de het composietmateriaal (Bron: Management, recycling and reuse of waste composites, 2010)	29
Tabel 4: Aantal Vlaamse producenten van thermohardende composieten per productiemethode (Inschatting van Sirris, 2015)	33
Tabel 5: Vlaamse bedrijven die vezelversterkte kunststoffen gebruiken, per marktsegment (Inschatting van Sirris op basis van NACE codes, 2015)	34
Tabel 6: Prijzen van harsmaterialen (JRC, 2013)	39
Tabel 7: Wereldwijde productievolumes en prijzen van glasvezelversterkte composieten op basis van productietechniek (JRC, 2013)	40
Tabel 8: Levensduur van toepassingen van composietmaterialen	48
Tabel 9: Printplaten vrijgekomen als gevaarlijk afval tijdens de verwerking van AEEA in 2015 (bron: 'Rapport 2015-België' en 'Rapport 2015-Vlaanderen', opgemaakt door de vzw Recupel)	54
Tabel 10: Geschatte huidige jaarlijkse afvalvolumes thermohardende composieten in verschillende landen (noot: er zit een grote onzekerheid op deze cijfers, wegens gebrek aan data)	56
Tabel 11: Eerste indicatie van de invloed van de gebruikte productietechniek op het potentieel om recyclee in te zetten (thermohardende composieten)	64
Tabel 12: Eerste inschatting van de milieu-impact van composietmaterialen en hun EoL-verwerking	84

Bijlage 2: Lijst van figuren

Figuur 1: EoL verwerking van post-consumer kunststoffen in Europa (2012)	20
Figuur 2: Sectorbevraging: aantal bevraagde actoren doorheen de keten	21
Figuur 3: Sectorbevraging: inhoudelijk	21
Figuur 4: Classificatie van composieten op basis van hun versterking (Bron: www.engineeringcivil.com)	23
Figuur 5: Mogelijke textielvormen voor composieten (Bron: KU Leuven)	24
Figuur 6: Thermohardende productieprocessen (bron: Gurit – Guide to composites (www.gurit.com) en mechanicalinfo.wordpress.com)	27
Figuur 7: Eigenschappen van vezelversterkte thermoharders (Bron: Management, recycling and reuse of waste composites, 2010)	29
Figuur 8: Toepassingen van composietmaterialen in industriële producten: (a) scheepsrompen (hand lay-up matten), (b) opslagtanks (wikkeltechniek-matten), (c) opslagtanks (wikkeltechniek)	30
Figuur 9: Toepassingen van composietmaterialen in de bouw: (a) constructie-elementen (pultrusie), (b) voorgevormde zwembaden (hand lay-up matten) (c) profielen (pultrusie)	31
Figuur 10: Toepassing van composietmaterialen in de publieke sector: (a) straatmeubilair (intrusie – korte vezels), (b) inbouwputten (recyclaat korte vezels) (c) SMC Composiet bank	31
Figuur 11: Toepassingen van composietmaterialen in consumentengoederen: sportmateriaal (RTM technologie)	31
Figuur 12: Toepassingen van composietmaterialen in de energiesector	32
Figuur 13: Toepassing van koolstofvezel in sportwagens, onderdelen als dakpanelen in composiet, carrosserie in biogebaseerde materialen in racewagen, chassis en structuurelementen in elektrische wagens	32
Figuur 14: Toepassing van glasvezelversterkte panelen in vrachtwagens en brandweerwagens	33
Figuur 15: Toepassing van glasvezelversterkte composieten als dragermateriaal in elektronische printplaten	33
Figuur 16: Belangrijkste toepassingen van vezelversterkte thermoharders in Vlaanderen - omzetcijfers	34
Figuur 17: Productie van glasvezelversterkte composieten in Europa (AVK Composites market report 2015)	36
Figuur 18: Productie van glasvezel wereldwijd (bron: VKC)	37
Figuur 19: Wereldmarkt voor koolstofvezelversterkte kunststoffen (http://www.vivis.de/phocadownload/2014_rur/2014_RuR_371_378_Meiners.pdf)	38
Figuur 20: Relatief belang van de meest voorkomende vezel-harscombinaties (wereldwijd) (bron: VKC)	39
Figuur 21: Belangrijkste productieprocessen voor glasvezelversterkte composieten (JRC, 2013)	40
Figuur 22: Productieprocessen voor koolstofvezelversterkte composieten (in kton, 2014) (bron: AVK, 2015)	41
Figuur 23: Marktgrootte in waarde (Environmental scientist March 2015 , Journal of the Institution of Environmental Sciences)	41
Figuur 24: GFRP in EU (bron: EuCia, AVK 2015 Market Report), noot: Construction includes wind industry	42
Figuur 25: Wereldwijde vraag naar koolstofvezels, per toepassing (in kton, 2014) (bron: AVK, 2015)	42
Figuur 26: Wereldwijde vraag naar koolstofvezelversterkte composieten, per toepassing (in kton, 2014) (bron: AVK, 2015)	43
Figuur 27: De circulaire economie (Bron: Ellen MacArthur Foundation)	43
Figuur 28: Waardeketen van vezelversterkte thermoharders (bron: Sirris)	44
Figuur 29: De afvalhiërarchie voor thermohardende composieten	45
Figuur 30: Geïnstalleerd vermogen aan windenergie in België (2015). (Bron: APERE)	49

Figuur 31: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en overeenkomstige hoeveelheid composietmateriaal (België)	50
Figuur 32: Windenergie in Nederland (http://www.windenergie-nieuws.nl/nederland/)	50
Figuur 33: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en overeenkomstige hoeveelheid composietmateriaal (Nederland)	51
Figuur 34: Geïnstalleerd vermogen in Frankrijk (bron: Le Monde)	51
Figuur 35: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en overeenkomstige hoeveelheid composietmateriaal (Frankrijk)	52
Figuur 36: Jaarlijkse aangroei in capaciteit en ontmanteling van EoL windmolens (Duitsland)	52
Figuur 37: Recyclageproces AB-VAL, FR: (a) proces, (b) input, (c) mogelijke producten	59
Figuur 38: Recyclage van koolstof vezels volgens volgende stappen: shreddering, sortering, pyrolyse om de vezels te isoleren, productie vezelmat uit gerecycleerde vezels, performantie-testen, product vervaardiging (http://www.compositesworld.com/blog/post/recycling-carbon-fiber-for-structural-applications)	60
Figuur 39: RYMYC (IT) recycleert vezels (a) en matten (b)	61
Figuur 40: Wervelbed proces	62
Figuur 41: Recyclage van koolstofvezels (ELG- UK)	63
Figuur 42: Recyclage van koolstofvezels (Procotex-BE)	63
Figuur 43: Recyclage van glasvezels (Neo-Eco)	64
Figuur 44: Compounding industrie: maken van master batches	65
Figuur 45: BMW i3: dak uit gerecycleerde koolstofvezel (recyclage door het Engels bedrijf SGL Group)	65
Figuur 46: Tejin (China): Onderdelen op basis van secundaire carbonvezel, geschikt voor compression moulding of spuitgieten	66
Figuur 47: Midden console van een Mini Clubman, een spuitgietonderdeel gebaseerd op secundaire carbonvezel en PA66 (BMW)	67
Figuur 48: TRL niveau van de verschillende recyclage technologieën 2015 (Bron: Cranfield University (UK) & University of Birmingham (UK))	68
Figuur 49: Belangrijkste technologieën voor CFRP recycling: (a) mechanische recyclage, (b) vezel terugwinning	69
Figuur 50: Remanufacturing van rCFRP	69
Figuur 51: Interreg project Recy-Composite	70
Figuur 52: Cresim project (productie eiland bij Cannon Afros R&D Department in Caronno Pertusella, IT)	71
Figuur 53: (1) Herstelling van GFRP via hand lay-up (http://www.fibreglast.com/product/fiberglass-repair-composite-repair/Learning_Center) (2) Versterking van een betonnen 'shear wall' met koolstofvezelversterkt composiet (bron: Composieten, basiskennis)	73
Figuur 54: Herstelling van een tankuitlaat (http://www.armorshieldlining.com/fiberglass-tank-nozzle-repair.html)	74
Figuur 55: Reparatie van boten (http://www.bluebird-electric.net/boat_repairs_mobile_grp_laminating_service.htm)	74
Figuur 56: Types van schade (http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Composite_Repair.pdf)	76
Figuur 57: Reparatietechnieken (http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Composite_Repair.pdf)	77
Figuur 58: Wikado speeltuin in Rotterdam, gemaakt uit afgedankte rotorbladen van windmolens (http://www.spatialagency.net/database/how/appropriation/2012.architecten)	78
Figuur 59: Hergebruik van stroken gerecupereerd composietmateriaal tot nieuwe producten (Hogeschool Windesheim)	79
Figuur 60: Plaatmateriaal op basis van gerecycleerde glasvezels	79
Figuur 61: Inspectie, onderhoud en herstelling als dienst (http://www.bladefence.com/services/spindurance)	80
Figuur 62: Inzet van drones voor inspectie van windmolens (http://www.offshorewind.biz/2015/10/07/drones-becoming-very-important-in-wind-turbine-inspections/)	80
Figuur 63: Monitoring systemen om schade aan windmolens snel te detecteren (http://www.woelfel.de/en/products/wind-energy/shmblade-iddblade/)	80

Bijlage 3: Bibliografie

1. Asokan A. et al. (2008). Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. Journal of cleaner production 17 (821-829).
2. <http://www.engineeringcivil.com>
3. <http://www.gurit.com>
4. <http://www.mechanicalinfo.worldpress.com>
5. Management, Recycling and Reuse of Waste Composites (2010).
6. <http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html#sthash.gyjXoWyA.dpbs>
7. <http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/reinforcements/carbon-fibrefiber/>
8. JRC (2013)
<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/11111111/27470/1/lbna25719enn.pdf>
9. Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composites Market: Global Industry Analysis and Opportunity Assessment 2014 - 2020
10. AVK (2015). Composite Market Report
11. www.vivis.de/phocadownload/2014_rur/2014_RuR_371_378_Meiners.pdf
12. Environmental scientist March 2015 , Journal of the Institution of Environmental Sciences
13. Kema (2010). MJA Composieten Recycling.
14. Guido Machiels (2015). Tijdschrift 'Varen', Juni 2015.
15. Oliveux G et al. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties. Progress in Material science 72 (61-99).
16. Pimenta S, Pinho ST (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook, WASTE MANAGEMENT, Vol: 31, (378-392).
17. European Wind Energy Association. Research note Recycling Wind Turbine Blades via http://www.ewea.org/fileadmin/files/our-activities/policy-issues/environment/research_note_recycling_WT_blades.pdf
18. <http://www.wind-watch.org/documents/recycling-wind-blades/>
19. Cherrington, R., et al. (2012). Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. Energy Policy via <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.076>
20. APERE (2015) via <http://www.apere.org/observatoire-%C3%A9olien>
21. Ten Busschen A. (2016). Hergebruik van end-of-life thermoharde composietproducten. Gepresenteerd op VKCN –SEMINAR Recycling van composieten:Probleem, kans of al opgelost? van 16 maart 2016 te Zwolle (NI).
22. <http://www.windenergie-nieuws.nl/nederland/>
23. http://www.lemonde.fr/economie/article/2014/05/07/eolien-en-mer-gdf-suez-remporte-les-appels-d-offres-au-treport-et-a-noirmoutier_4413044_3234.html
24. <http://aerocircular.green/>
25. Waterrecreatie Advies BV (2014). Aantal 'end of life' boten in Nederland en potentiële afvalstromen – Inclusief actualisatie aantal pleziervaartuigen in Nederland 2005 -2014.
26. <http://www.habitos.be/nl/tuin/primezwembad-zit-in-de-lift-4480/>
27. Sohaili J. , Muniyandi S.K. , Mohamad S.S. (2012). A Review on Printed Circuit Boards Waste Recycling Technologies and Reuse of Recovered Nonmetallic Materials. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 2,

- February-2012 1 via <http://www.ijser.org/researchpaper/A-Review-on-Printed-Circuit-Boards-Waste-Recycling-Technologies.pdf>
28. Huisman J, Magalini F, Kuehr R, Maurer C, Ogilvie S, Poll J, Delgado C, Artim E, Szlezak J, Stevels A. (2008). 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Final report.
 29. <http://www.mace.manchester.ac.uk/our-research/research-themes/innovative-manufacturing/research-projects/exhume/>
 30. <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>
 31. <http://www.ecowolfinc.com/home.php>
 32. <http://www.filon.co.uk/>
 33. <http://www.hambleside-danelaw.co.uk/>
 34. <http://www.bre.co.uk/page.jsp?id=707>
 35. <http://www.reprocover.com/>
 36. <http://www.3b-fibreglass.com/>
 37. <http://www.m-c-r.com/>
 38. <http://abval.fr/fr/page-daccueil/>
 39. <http://www.compositesworld.com/blog/post/recycling-carbon-fiber-for-structural-applications>
 40. Rybicka, J., et al.(2015). Technology readiness level assessment of composites recycling technologies, Journal of Cleaner Production via <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.104>
 41. <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>
 42. http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201301/20130116_145654_17343_EURECOMP_FinalSummaryReport_Sep2012.pdf
 43. <http://www.recycleurs-bretons.fr/actualites/61-les-recycleurs-bretons-et-nautisme-en-bretagne-un-partenariat-unique-en-france.html>
 44. EuCIA (2011). Position paper via http://www.avk-tv.de/files/20131125_industry_position_paper_on_recycling_2011_3.pdf
 45. UK Environmental scientist. https://www.the-ies.org/sites/default/files/journals/ES_March2015_new-materials.pdf
 46. <http://www.compositesworld.com/news/cannon-gives-update-on-recycled-carbon-fiber-project>
 47. <https://www.materialssampleshop.com/products/glass-fibre-board>
 48. <http://blog.sirris.be/blog/more-significant-role-drones-wind-turbine-inspections>
 49. <http://www.offshorewind.biz/2015/10/07/drones-becoming-very-important-in-wind-turbine-inspections/>
 50. <http://www.offshorewind.biz/2015/10/07/drones-becoming-very-important-in-wind-turbine-inspections/>
 51. <http://www.woelfel.de/en/products/wind-energy/shmblade-iddblade/>
 52. <https://connect.innovateuk.org/documents/3228340/3708155/Composites%20REAP%202021%20FINAL.pdf>

Bijlage 4: Resource efficiency action plan (REAP) voor de composietsector (VK)

Eind 2013 werd een Resource Efficiency Action Plan (REAP)⁶⁹ voor de composietsector uitgewerkt door URS en NetComposites in opdracht van Composites UK met ondersteuning van WRAP en Materials KTN. Het actieplan heeft als doel om afval te verminderen en de grondstoffenefficiëntie te verbeteren binnen de sector van de vezelversterkte materialen. De kernthema's uit het actieplan zijn de volgende:

Theme	Description
Markets	Help develop commercially viable markets for GFRP recycle
Process	Support the commercialisation of new processes for GFRP and CFRP recycling
Materials	Provide consistency in the categorisation of composite wastes
Knowledge	Disseminate information on best-practice and emerging technologies to the sector, particularly SMEs

De corresponderende acties die voorop worden gesteld zijn de volgende:

⁶⁹ <https://connect.innovateuk.org/documents/3228340/3708155/Composites%20REAP%20021%20FINAL.pdf>

Theme	Action
Markets	Develop an exemplar business model for the recycling of manufacturing waste by UK composite component manufacturers
	Develop case studies for applications of recycle
	Facilitate support for the development of new applications for GFRP recycle, including assistance with identifying funding opportunities
Process	Engage with universities and facilitate cooperation with industry partners to commercialise new recycling processes, e.g. by facilitating access by industry to the prospectus of research and development capability within UK universities
Materials	Develop a grading scheme for recycle (initially process waste, with potential to expand to cover end-of-life waste in due course)
	Evaluate practical and financial aspects of enhanced product ID labelling
	Evaluate usage patterns and wastage rates of consumables with a view to identifying barriers to recycling
Knowledge	Develop Resource Efficiency Best Practice toolkit/guidelines for SMEs, starting with waste management
	Develop a case study for resource-efficient manufacturing
	Develop a case study for recycling of manufacturing waste
	Evaluate need for a central source of benchmarking information and clearing house for data on composites for use in Life Cycle Analysis