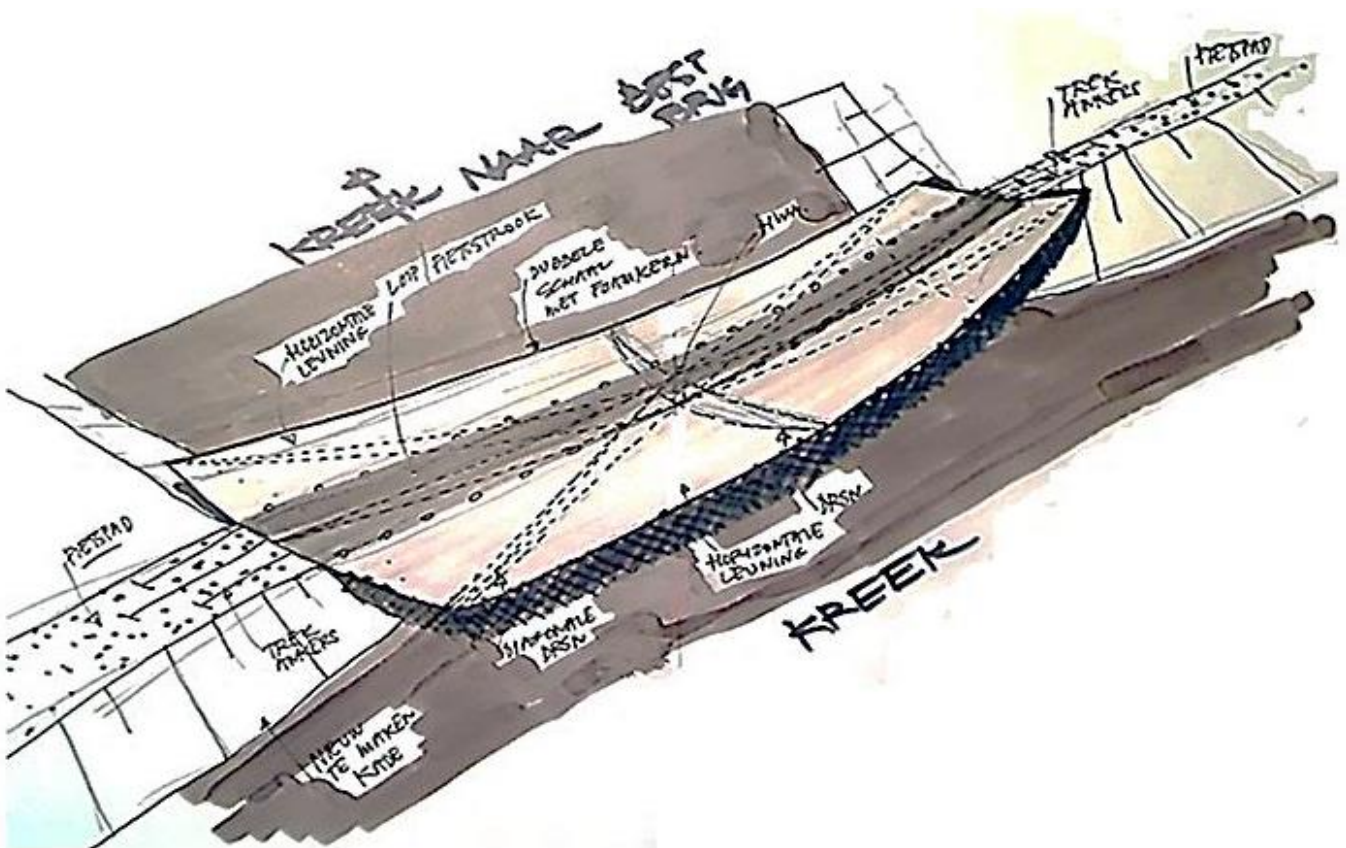


Bio-Composieten

Ontwerpen met vezels en 'bio' polymeren

Case study Bio-brug



Een CompositesNL-publicatie

Mede mogelijk gemaakt door SIA

Katrin Tazelaar

Bio-Composieten

Ontwerpen met vezels en 'bio' polymeren

Case study Bio-Brug

Katrin Tazelaar

1^e druk

Meegedacht en correctie gelezen door Dr. Rogier Nijssen, lector 'compsieten' bij de hogeschool Inholland en Alwin Hogendoorn, portfoliomanager onderzoek CoE BBE, hogeschool Avans

Afbeelding omslag tekening op de voorkant: 'schets van de bio-brug over de Dommel' door de architecten Ad Kil en Ro Koster

Afbeelding omslag op de achterkant: foto gemaakt door Necmettin Aydin, opening van de bio-brug te Eindhoven, Oktober 2017

Copyright©2017 Dr. Katrin Tazelaar, Hogeschool Inholland

Hoofdverantwoordelijk voor alle fouten die u tegen komt en daarmee correspondentie auteur

katrin.tazelaar@inholland.nl

ISBN: 978-90-77812-53-2



Dit werk is gelicenseerd onder de licentie Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal. Ga naar <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> om een kopie van de licentie te kunnen lezen.

Dit boek is Open Access in digitale vorm verkrijgbaar via o.a.:

www.inhollandcomposites.nl

www.compositesnl.nl

Gedrukte exemplaren zijn mogelijk gemaakt dankzij hogeschool Inholland.

Deze exemplaren zijn tegen verzend- en administratiekosten beschikbaar via de branchevereniging composieten CompositesNL.



Voorwoord

Met veel plezier presenteer ik het voorliggende boekwerk als resultaat van het eind 2014 opgestarte SIA Raak MKB project “Biocomposieten voor civiele en bouwkundige toepassingen; Biobased brug”. Ik ga er van uit dat dit openbaar verkrijgbare boekwerk veelvuldig zijn weg zal kunnen vinden richting in biocomposieten geïnteresseerde professionals in bedrijfsleven en vooral ook richting studenten en scholieren in het MBO, het HBO en de universiteiten. Destijds, in 2014, wilden we graag gestructureerd de haalbaarheid onderzoeken van een volledig biocomposieten voetgangersbrug in Terneuzen. Gaande het project bleek dat, dankzij onder andere uitgebreid materialenonderzoek bij InHolland Composites en uitgebreide stijfheid en sterkte berekeningen, een volledig biocomposieten voetgangersbrug als haalbaar moest worden beschouwd en werd door projectpartner TU/e via het 4TU-programma additionele financiering voor een brug te TU/e Campus Eindhoven verkregen. Door middel van het inrichten van een grote werkplaats van het lectoraat CoE BBE Biobased Bouwen te Rosmalen werd een plaats verkregen waar we allereerst een 2 meter prototype op ware grootte een vervolgens de 14 meter lange volledig biocomposieten Dommelbrug als wereldwijd unicum met ongeveer 100 studenten hebben kunnen bouwen. Qua publiciteit hebben we hierbij vele kranten maar ook bijvoorbeeld Studio040, het VRT televisiejournaal, NOS radionieuws en BNR Radio gehaald.

Voor de totstandkoming van dit boekwerk is een enorme inspanning geleverd door met name Katrin Tazelaar en InHolland waarvoor mijn dank. Voor het totaal aan geleverde project-inspanningen is het vooral belangrijk om te benadrukken dat er sprake is van een groepsinspanning waarvoor elk van de 16 SIA Raak projectpartners zijn unieke bijdrage heeft geleverd. Voor de in dit boek beschreven case study rond de 14 meter lange Dommelbrug dient daarnaast specifiek dank uit te gaan richting TU Delft, het 4TU Lighthouse programma, het Willem I college, de Bossche vakschool en Spark Rosmalen.

Veel leesplezier toegewenst,

Alwin Hoogendoorn (Centre of Expertise Biobased Economy)

Projectpartners in het SIA Raak MKB project “Biocomposieten voor civiele en bouwkundige toepassingen; “Biobased brug”



Verantwoording

Alle materialeneigenschappen in dit voorliggende boek zijn gegenereerd in het lab van Inholland Composites.

Alle platen zijn geproduceerd met vacuuminfusie en met een relatief hoge vezel-volumepercentage van 60 - 70%. Men moet hierbij niet vergeten dat de resultaten een benadering zijn en niet als absolute getallen in een ontwerp mogen worden gebruikt.

Aansluitend aan de injectie worden de platen 3 uur bij 80°C in de oven navernet. Uit de platen worden voor elke test 8-12 teststrookjes volgens ASTM D3039 geproduceerd, verouderd en in de 10 kN of 200 kN “ZwickRoell” Trekttestbank getest, gebruik makend van de software testXpertII. Voor het overzicht is het gemiddelde van de gemeten testdata weergegeven. Volgende tests zijn met minimaal 8 stroken per laminaat en per test uitgevoerd met een snelheid van 2 mm/min en een pre-load van 2N: Standaard trektest, trek na veroudering in water bij 70°C en trek na veroudering onder invloed van UV. Buigproeven zijn uitgevoerd volgens de standaard voor buigproeven ASTM D 790-03 (Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials) met een snelheid van 1mm/min en een 32 mm spanne tussen de twee ‘lower supports’ van de opstelling.

Voor de veroudering met UV zijn teststrookjes samen met een epoxymuntje in een UV black box (inholland ontwerp) voor 504 uur onder een UVA-340 lamp geplaatst van het merk Q-Lab Corp met een instalingspiek bij 340 nm, wat overeenkomt met zonstraling op het midden van een hoogzomerdag. De polymeermunt wordt voor en na blootstelling aan UV op moleculaire veranderingen geanalyseerd met een FT-IR spectrometer van Perkin Elmer aan de TU Delft.

De wateropname van het materiaal wordt experimenteel volgens de standards ISO 62:2008 (Plastics – Determination of water absorption) en ASTM D 570 – 98 (Water Absorption of Plastics) bepaald en vervolgens wordt de diffusie coëfficiënt (D) met behulp van vergelijkingen (1) – (5) bepaald. Om D uiteindelijk na (1) te kunnen berekenen is de wateropname in % nodig.

De tijd is weergegeven als wortel seconden. De opname van glas-greenpoxy is als vergelijk mee genomen. Het is belangrijk een procedure te bepalen en deze aan te houden. De teststroken moeten in vooraf bepaalde intervallen uit het water gehaald, even afgedroogd en gewogen worden. De weegschaal is een Metler Toledo, type AG204 met een gevoeligheid van 0,1mg. Het opgenomen water zal met de tijd uit de samples verdampen wat met een hogere temperatuur sneller gaat. Daarom is het voor de nauwkeurigheid aan te raden om telkens dezelfde tijd aan te houden tussen het onderbreken van de wateropname en het bepalen van het gewicht. In deze studie zijn 20 seconden bepaald voor dat het teststrookje gewogen wordt. De tests zijn uitgevoerd zonder toepassing van een coating, dus te beschouwen als “worst case”.

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1	Waarom bio-based?	11
1 - 1	Inleiding.....	11
1 - 2	Uitdagingen bij het realiseren van een bio-based brug	12
1 - 3	Biobased economy	13
1 - 3.1	Keteneconomie met recycling	13
1 - 4	Wat is bio-based?	15
1 - 5	Biocomposieten en de circulaire gedachte	18
1 - 5.1	Wat maakt een composiet tot een biocomposiet?	18
1 - 5.2	Recyclen van composietmaterialen	20
Hoofdstuk 2	De Bio-vezel	25
2 - 1	Vezelverwaarding in Nederland.....	27
2 - 1.1	Vlas en hennep	27
2 - 2	Vezelopbouw	29
2 - 3	Vezeleigenschappen	31
2 - 3.1	Mechanische eigenschappen	31
2 - 3.2	Waterabsorptie vezel.....	32
2 - 3.3	Schimmels.....	33
2 - 3.4	Impact door ultraviolette straling.....	34
2 - 3.5	Brandbaarheid en thermische degradatie	34
Hoofdstuk 3	Kernmaterialen	37
3 - 1	Mycelium composiet	38
3 - 1.1	Oorsprong.....	38
3 - 1.2	Productie, Proces en variabelen	40
3 - 1.3	State of the art.....	41
3 - 1.4	Materialeigenschappen	42

Hoofdstuk 4 Bio-polymeren 45

4 - 1	Bio-componenten van polymeren	48
4 - 1.1	Echt groene polymeren	48
4 - 2	Het grillige gedrag van polymeren.....	50
4 - 2.1	Opbouw polymeerketen.....	51
4 - 2.2	Kristalliniteit	53
4 - 2.3	Glasovergangstemperatuur	54
4 - 2.4	Sterkte en E-Modulus	55
4 - 2.5	Dwarsverbanden en 'ontwerp' van eigenschappen	56
4 - 2.6	Beschikbare bio-polymeren.....	58
4 - 3	Chemie en verwerkbaarheid van de harsen	60
4 - 3.1	Furaanhars.....	60
4 - 3.2	Polyester chemie	61
4 - 3.3	Epoxychemie	62
4 - 3.4	Polyurethaan chemie.....	63
4 - 4	Levensduur van polymeren	66
4 - 4.1	Waterabsorptie van polymeren.....	66
4 - 4.2	Hechting tussen matrix en vezel	68
4 - 4.3	Coating tegen wateropname	68
4 - 4.4	Impact van ultraviolette straling.....	69
4 - 4.5	Thermochemische degradatie	72

Hoofdstuk 5 Brug studie materialen..... 75

5 - 1	Vloei-eigenschappen combinaties.....	75
5 - 2	Materiaaleigenschappen combinaties.....	76
5 - 2.1	De beste keuze voor een brug	77
5 - 3	Materiaaleigenschappen vlas/greenpoxy.....	78
5 - 3.1	(Buig) Sterkte en (Buig) Modulus.....	78
5 - 3.2	Wateropname en diffusie coëfficiënt	79
5 - 4	Statische eigenschappen na wateropname	82
5 - 5	Degradatie bio-composieten samengevat.....	84

Hoofdstuk 6 Ontwerpen met bio-composieten 87

6 - 1	Functionele eisen.....	88
6 - 2	Het ontwerp van een laminaat	90
6 - 2.1	De vezeldraad	90
6 - 2.2	Faalmechanismen	91
6 - 2.3	Conversiefactoren.....	91
6 - 2.4	Vezel-matrix ratio	93
6 - 2.5	Productie van een laminaat	94
6 - 2.6	Hoe maakt men nu de keuze voor de juiste materialen?	95
6 - 3	Ontwerpconcepten.....	96
6 - 3.1	Buigligger met trekkracht	97
6 - 3.2	Kabelbrug.....	102
6 - 3.3	Boogbrug	103
6 - 3.4	Buigligger	105
6 - 4	Uitwerking Bio-brug.....	108
6 - 4.1	Ontwerp en uitwerking.....	108
6 - 5	Modulair ontwerpen – één stap verder richting de circulaire gedachte?.....	117
6 - 5.1	De modulaire ontwerpvarianten	117
6 - 5.2	Ontwerpen van segmenten en de verbinding daarvan.....	119
6 - 5.3	Is de verbinding sterk genoeg?	122

Hoofdstuk 7 Terug – en Vooruitblik 127

7 - 1	Een zaak van vertrouwen	127
7 - 1.1	Echt circulair	129

Literatuur 130



Hoofdstuk 1

Waarom bio-based?

Afval – Daar hebben we genoeg van. Niet alleen zijn de afvalbergen nauwelijks meer te verwerken maar met het oog op grondstof schaarste en de nog steeds toenemende milieuvervuiling moeten we omdenken. Het project 'bio-brug' is een voorbeeld van denken in een nieuwe richting – de bio-based economy

1 - 1 Inleiding

Met de huidige groei van de wereldeconomie, is de voorraad van niet-hernieuwbare materialen binnen 50 jaar voor het grootste deel uitgeput. Wat betekent dit voor de factoren energie, materiaal en water? De zon is een oneindige energiebron, maar materialen zijn slechts in een eindige vorm aanwezig. Materialen worden gebruikt, soms nog hergebruikt, maar uiteindelijk eindigen ze als afval. Hergebruik betekent meestal een gebruik met een lagere kwaliteit; het cascade-effect (downcycling). De mate waarin materiaal hergebruikt kan worden hangt voor een belangrijk deel af van de beschikbaarheid van technieken om materialen van elkaar te scheiden in bruikbare nieuwe componenten. Alle vormen van het winnen, gebruiken en recyclen van materialen kosten energie. Voor veel producten en materiaaltoepassingen zijn geen goede recycling-technieken, of deze kosten te veel energie. Veel materialen eindigen daarmee als laagwaardig product op de afvalberg [1].

Recycling met als resultaat een product van hogere kwaliteit (upcycling) is technisch weliswaar mogelijk maar zo kostbaar dat dit in de praktijk niet gedaan wordt. Daarom kiest men steeds meer de weg van 'schijn-upcycling'. Oude materialen wordt een nieuwe en duurzame functie gegeven door de voorwerpen aan hun eerste 'end of life' hetzij geheel elders opnieuw te gebruiken, of te ontleden in segmenten. Modulair ontwerpen kan een mooi gereedschap zijn om al in het ontwerpproces aan de mogelijkheid van schijn-upcycling van de modules te denken.

Een andere methode van upcycling is door voor hernieuwbare materialen te kiezen. Dit type materiaal kan eindeloos worden hergebruikt. Indien niet te veel vervuild, worden deze materialen opgenomen in de biologische cyclus. In beide gevallen is een van de randvoorwaarden dat het materiaal niet tot een onbruikbare toestand gedegradeerd is.

Het voorliggende boek beschrijft de studie rondom ontwerpen onder inachtneming van de circulaire economie gedachte. Bijzondere aandacht zal worden besteed aan de degradatie mechanismen van de gebruikte materialen.

1 - 2 Uitdagingen bij het realiseren van een bio-based brug

Het gebruik van hernieuwbare materialen in dergelijke toepassingen is tot nu toe beperkt. Voor het toepassen van bio-composieten in constructief belastbare structuren bestaan nu nog diverse hindernissen zoals bijvoorbeeld: gebrek aan kennis en ervaring rond eigenschappen, regelgeving welke nog geen rekening houdt met biocomposieten, technische uitdagingen zoals bijvoorbeeld de hechting tussen de hars en de biovezel en risico's rond (biologische) degradatie van de vezels en harsen bij levensduren van 50 - 100 jaar of meer, geringe beschikbaarheid van bio-based vezels en harsen, beperkte lengte van de vezels. Een mogelijk voordeel van het toepassen van bio-based composieten is dat de specifieke stijfheid (stijfheid per eenheid van gewicht) voor bio-vezels doorgaans relatief hoog is, hetgeen in een stijfheidsgedomineerd brugontwerp kan leiden tot lichtgewicht constructies (bij het ontwerp van composiet bruggen is de stijfheid van het materiaal vaak de dominante parameter). Mede hierdoor was de toepassing van 100% bio-composieten in bruggen tot aan 2016 onbestaand. In het project "Bio-composieten voor bouwkundige en civiele toepassingen" waren de ambities zeer hoog gespannen: voor de 100% bio-based brug gold medio 2014 dat deze wereldwijd nog niet bestond, de 100% bio-based harsen vooralsnog alleen op laboratoriumschaal beschikbaar zijn en er onbekend was hoe een dergelijke brug er uit moet zien en gebouwd kan worden [2].

Ontwerpen kan op twee manieren: Of de vorm is gegeven en er moet het beste materiaal voor gevonden worden of de materiaaleigenschappen zijn bekend en er wordt op basis daarvan de juiste vorm gekozen. Voor de brug is de combinatie vlas en greenpoxy de keuze die het beste voldoet aan de circulaire gedachte én omdat de mechanische eigenschappen leidend zijn. Het materiaal moet sterk en stijf genoeg zijn om druk- en trekkrachten op te vangen, niet met de tijd door te buigen, weersinvloeden te kunnen weerstaan en aan de duurzaamheidcriteria voldoen.

Dit voorliggende boek beslaat een overzicht van vlas/greenpoxy eigenschappen, de keuze voor het juiste ontwerp op basis van een conceptbeschouwing en het eigenlijke ontwerp.

1 - 3 Biobased economy

De afgelopen decennia heeft de maatschappij geleefd in een lineaire economie, d.w.z. een economie waarin materiaal aan de aarde onttrokken wordt, hergebruik van materialen minimaal is en daardoor voortdurend behoefte is aan nieuwe materie. Dit systeem draagt bij aan de uitputting van bronnen en vervuiling van de omgeving. Het ideaal zou zijn binnen de voorraad aan beschikbare materie deze in gesloten kringlopen voortdurend te hergebruiken. Het voorzien in prikkels om te recyclen vormt dan een eerste stap op weg naar de circulaire economie.

1 - 3.1 Keteneconomie met recycling

In het kader van de keteneconomie met recycling visualiseert de ladder van Lansink de verschillende end-of-life scenarios van een product [3]. Biocomposieten bestaan uit biovezels en een polymeer met biocomponenten. Thermoplastische polymeren kunnen in principe worden gescheiden van de vezels door smeltprocessen. Thermohardende polymeren zouden een chemisch scheidingsproces moeten ondergaan of op een andere wijze als geheel moeten worden verwerkt. In het vervolg zullen de verschillende stappen nader toegelicht worden.

1 - 3.1.1 Composteren

Composteerbaar wordt gedefinieerd via internationale normen, zoals EN 13432, die zegt dat de afbraak plaats moet vinden binnen 6 tot 12 weken om te voldoen aan de eisen van de huidige composteerinstallaties. Hierbij dient te worden opgemerkt dat composteerbare materialen biodegradeerbaar zijn, maar niet alle biodegradeerbare materialen zijn composteerbaar.

Voor bio-based composieten geldt in het algemeen dat de vezel composteerbaar is maar het matrixpolymeer meestal niet. Overigens bestaan er ook polymeren, afkomstig van fossiele grondstoffen die composteerbaar zijn; deze vallen niet onder de groep bio-based. Koolhydraten in organische grondstoffen worden door micro-organismen enzymatisch of door temperatuur, vocht of UV tot kleinere moleculen afgebroken. De micro-organismen consumeren deze moleculen en zetten ze om in water, CO₂ en energie. Tijdens het composteren komen broeikasgassen vrij, de emissie daarvan is theoretisch net zo hoog als bij verbranding, waarbij bij verbranding nog energie vrij komt die gebruikt kan worden. Onder andere ontstaat bij het composteren het gas methaan dat het broeikaseffect twintig keer meer bevordert dan CO₂ [4].

Er zijn een aantal redenen waarom composteren onderaan de ladder van Lansink staat. Zo is het moeilijk te bepalen hoeveel van het organisch materiaal door de micro-organismen en in welk tijdsbestek wordt omgezet. De half afgebroken moleculen zijn in sommige gevallen toxisch voor het ecosysteem. Composteerbare polymeren bij voorbeeld fragmenteren in bijna onzichtbare kleine deeltjes die in de voedselketen terecht kunnen komen [5]. Composteren (storten) behoort dus helemaal niet tot de meest milieuvriendelijke mogelijkheden van het 'end-of-life' design van een product.

Composteren is daarentegen wel erg kosteneffectief en het zorgt (in tegenstelling tot storten) voor het zeer gewenst circulair terugbrengen van vele bodemnutriënten zoals organische stof, fosfor, zwavel, selenium, etc.

1 - 3.1.2 Hergebruiken

Het hergebruik van materialen, afkomstig van hernieuwbare planten, is te prefereren boven composteren, waarbij een onderscheid gemaakt moet worden tussen hergebruik van:

- het product,
- componenten van het product (modules)
- de materialen.

Hergebruik is in sommige gevallen moeilijk uit te voeren, bijv. met kunststoffen die na verloop van tijd degraderen. Thermohardende polymeer composieten worden vaak in kleine stukjes gehakt en als vulmiddel opnieuw gebruikt. Thermoplastische polymeren hebben in een vezel-matrix combinatie in sommige gevallen de voorkeur ten opzichte van thermohardende polymeren, omdat een thermoplastisch materiaal na verandering door invloeden van de omgeving door verhitting hersteld kunnen worden, mits de ketens nog niet zijn afgebroken. Verschillende problemen spelen met name in de bouwsector hierbij een rol [1]:

- gebruik van organische materialen (bijvoorbeeld petroleum), composieten en producten met chemische complexiteit
- hoge arbeidskosten voor het ontmantelen van vermengde materialen
- gebruik van verbindingstechnieken met materialen/elementen die moeilijk te verwijderen zijn, zoals pneumatische nagels of nieten
- het gebruik van coatings en 'inkapselingen' van elementen met veel verschillende afwerkklagen als integraal onderdeel van producten en componenten
- er is geen langdurig eigenaarschap, waardoor kosten voor aanpassing, renovatie en afbraak/sloop niet bij de oorspronkelijke eigenaar 'meetellen'
- de perceptie dat het opnemen van demontabele componenten of elementen, dan voor expliciet kort gebruik (bijvoorbeeld exposities), de waarde zal verminderen en zal leiden tot compromissen met betrekking tot esthetiek en/of veiligheid.

1 - 4 Wat is bio-based?

In sommige ecologische kringlopen worden biologische grondstoffen gebruikt om producten te maken. Na gebruik zijn de producten voeding voor nieuw te groeien biomassa die weer opnieuw grondstoffen voor producten kunnen zijn. Dit gedeelte van de circulaire economie wordt ook wel aangeduid als de bio-based economie.

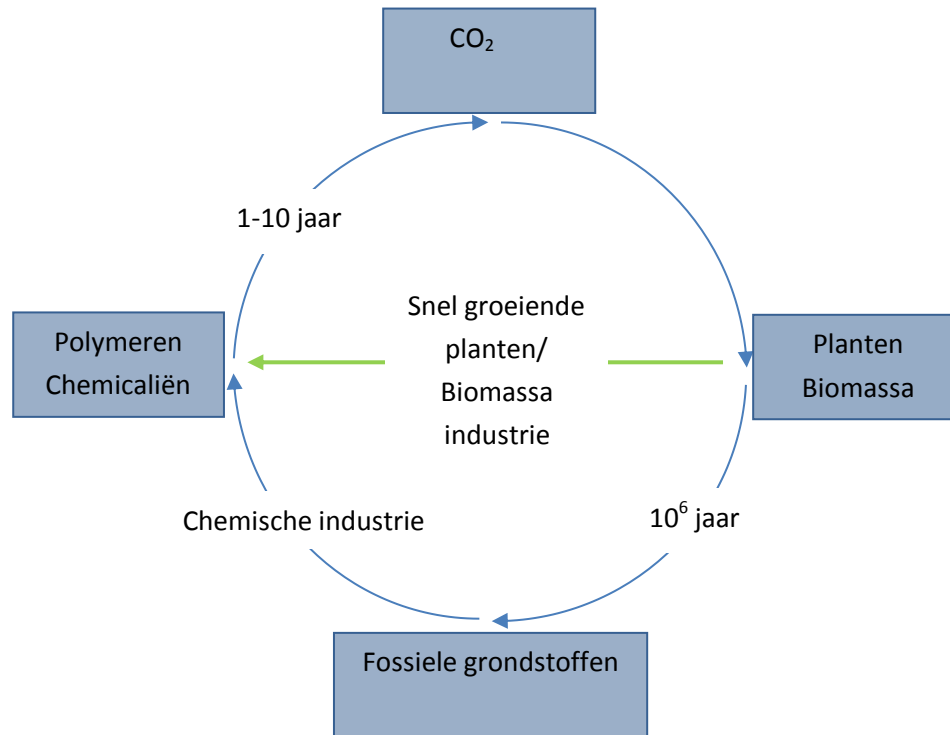
Voordat de term bio-based wordt toegelicht is het handig om 'hernieuwbaar' te definiëren. Hernieuwbaarheid is de mate waarin een bron zich aanvult ten opzichte van het verbruik ervan. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen snel en langzaam hernieuwbaar. Organisch plantenmateriaal wordt over een periode van 10^6 jaar tot fossiele grondstoffen omgezet, de bron voor benzine, chemicaliën en plastics. Binnen 1-10 jaar worden deze producten verbruikt (in de bouw duurt het wat langer) en wordt koolstof in vorm van CO_2 aan de atmosfeer teruggegeven, zie afbeelding 1.

Het omzetten van biomassa tot fossiele grondstof ten opzichte van de conversie door consumptie duurt verhoudingsgewijs lang en moet als langzaam hernieuwbaar worden beschouwd.

Bio-gebaseerd is niet per definitie biodegradeerbaar/composteerbaar. Bio-gebaseerd betekent dat een materiaal van snel hernieuwbare biomassa is afgeleid (zie NPR CEN 16208), bijvoorbeeld vanuit natuurlijke vezels van snel hernieuwbare planten in combinatie met een polymeer gemaakt van bouwstenen afkomstig van snel hernieuwbare planten, niet afkomstig uit de voedselketen.

Het gebruik van snel groeiende planten als grondstof bron, waarbij de tijdsduur van conversie van dezelfde grootteorde is als de periode van koolstof fixatie door plantengroei, levert bio-gebaseerde grondstoffen [6]. Dit is bijvoorbeeld het geval bij:

- Snelgroeiende gewassen, liefst niet uit de voedselketen zoals hennep en vlas
- Gewassen, bijvoorbeeld graan, maïs, koolzaad of suikerbieten, groene biomassa zoals grassen, houtige biomassa en aquatische biomassa, zoals algen of zeewier
- Reststromen die in het veld vrijkomen, zoals stro, hooi, bietenloof maar ook mest
- Reststromen die bij een productieproces vrijkomen, zoals resthout, aardappelstoomschillen, oliezadenschroot, wortelschaafsel en koffiedik
- Reststromen die vrijkomen na het gebruik als product, zoals afvalhout, GFT en textiel.



Afbeelding 1 Koolstof cyclus, naar [7]

Snel groeiende planten hebben een lagere CO₂ footprint en verbruiken minder primaire energie. Primaire energie wordt gedefinieerd als de totale energie die nodig voor de verwerking van plant tot bruikbaar vezelmateriaal of textiel. Om bijvoorbeeld hennep vezels uit de plant te extraheren wordt de hennep plant gesneden, geroot en gedroogd, waarna de bast van de vezel gescheiden wordt. De vezels worden afhankelijk van de toepassing verschillend behandeld.

Het winnen van lange vezels is een langdurig proces. Daarom worden voornamelijk korte vezels gewonnen wat overigens ertoe leidt dat van hennep alleen viltmatten commercieel verkrijgbaar zijn en geen weefsels (Carus et al, 2008). In tabel 1 wordt het primaire energieverbruik voor de productie van hennep en vlas vezels in vergelijking met carbon en glasvezels weer gegeven. Met 5GJ/t is het energieverbruik voor de productie van hennep het laagst [8].

Tabel 1 CO₂ footprint van snel hernieuwbare planten versus carbon en glas

Vezel	Emissie broeikasgas [t CO₂/t vezel]	Primair gebruik energie [GJ/t]
Carbon	1,7	290
Glas	2,2	35
Vlas/Hennep	0,714286	5-10

Bronnen: [9], [8]

Gezien de eindigheid van fossiele grondstoffen is het sluiten van de keten via recycling van de matrix tot gelijkwaardige grondstof van groot belang. Voor fossil-based thermoplastische plastics in composieten kan degradatie van de polymeerkwaliteit optreden door het korter worden van de polymeerketens. In een hergebruik van gedegradeerde polymeren spreekt men van downcycling. Ook voor fossil-based thermohardende harsen in composieten zijn er wereldwijd nog geen 20 bedrijven aan te wijzen die zich hebben gespecialiseerd in het bedrijfsmatig recyclen van zowel het productieafval alsmede de end-of-life producten (zie paragraaf 1-5.3). De momenteel toegepaste vormen van recycling zoals het bijmengen van gehakselde composieten bij de cementproductie zijn beter te classificeren als downcycling vanwege de vervuiling en verlies van de polymeer grondstof. Een interessante route, die in paragraaf 1-5.3 wordt besproken, vormt de chemische recycling aangezien hierbij monomeren vanuit de harsen worden terug gewonnen. Deze route wordt echter, voor zover bekend, nog niet commercieel bedrijfsmatig toegepast. Een potentievolle oplossing voor de bovenstaande problemen ligt in de ontwikkeling en toepassing van 100% bio-based composieten ook wel biocomposiet genaamd. 100% biocomposieten zijn opgebouwd uit:

- natuurlijke vezels zoals vlas, hennep, sisal of jute
- 100% bio-based hars of plastic;
- optioneel: een bio-based kernmateriaal zoals biofoam (PLA), mycelium materiaal (FungiBlocks) of kurk gemaakt van een eindige grondstof zoals fossiele olie.

Biomassa	Biomassa
Niet composteerbaar	Hernieuwbaar Composteerbaar
Fossiele grondstof	Fossiele grondstof
Niet composteerbaar	Composteerbaar

Afbeelding 2 Gebruiksmatrix fossiel versus biomassa

Een groot verschil tussen standaard composieten en biocomposieten zit in de onvoorspelbaarheid van de vezel en de grote gevoeligheid voor vocht tijdens productie, weersinvloeden en de resulterende degradatie. In het kader van dit boek zal daarom een relatie gelegd worden tussen de door weersinvloeden of procesomstandigheden veranderende structuur en de resulterende mechanische eigenschappen van de vezel.

1 - 5 Biocomposieten en de circulaire gedachte

De tegenhanger van de lineaire economie is de circulaire economie. Dit is een economisch systeem dat gebaseerd is op kringlopen door het hergebruik van producten en daardoor gebruik in plaats van verbruik van grondstoffen. Een uitgangspunt hierin is dat de ecologische footprint van het economisch systeem gereduceerd wordt tot nul. Het gebruik van bio-based composieten past bij de volgende scenario's

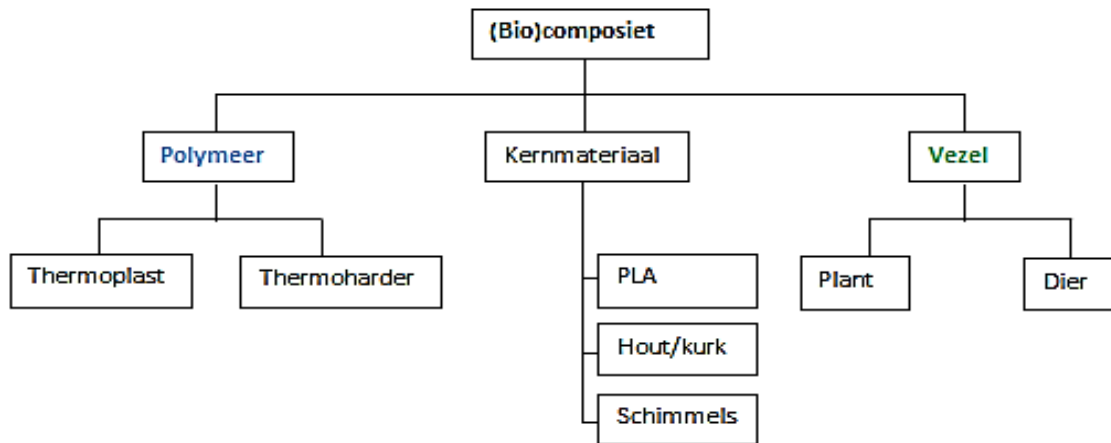
- een efficiënte verhouding tussen gewicht, vervaardiging, materiaalgebruik, ontwerp en functie
- minder transport
- minder afval
- hergebruik van afval in een gesloten kringloop
- het vervangen van uitputbare grondstoffen door 'hernieuwbare' brandstoffen en materialen
- ontwikkelen nul-materialen: materialen die geen milieubelasting veroorzaken [1].

1 - 5.1 Wat maakt een composiet tot een biocomposiet?

Biocomposieten zijn composieten waarbij minstens 30% van de bestanddelen bio-gebaseerd zijn. Uit de praktijk zijn veel voorbeelden bekend van gebruik van biopolymeren (cellofaan) en bio-vezels (hout-epoxy laminaat), maar echte biocomposieten worden nog weinig toegepast.

1 - 5.1.1 Componenten en bio-gehalte

Over biocomposieten is er vanuit de literatuur weinig bekend. De state-of-the-art kennis over biocomposieten [10], [11] beperkt zich tot fundamenteel onderzoek op materiaal (proefstuk) niveau. Er is nauwelijks literatuur bekend over toepassing van biocomposieten in structureel belastbare constructies zoals bruggen. Voor elk composietmateriaal, waaronder ook biocomposiet geldt dat de composiet een combinatie vertegenwoordigt van de eigenschappen van de afzonderlijke hars en vezels [12]. De eigenschappen van biocomposieten zijn hierbij een functie van het gekozen productieproces, o.a. de uithardingstemperatuur en al dan niet aanwezige degradatie gedurende de ontwerp-levensduur. In het vervolg worden biocomposieten naar hun componenten beschreven, de biovezels en de matrixbiopolymeren. De eigenschappen van het als meest geschikt gekozen biocomposiet worden aan der hand van case studie 'Bio-brug' toegelicht.



Afbeelding 3 Vereenvoudigd schema van bio-composiet en haar componenten

Afbeelding 3 geeft de componenten van biocomposieten weer. Zoals voor standaard composieten geldt ook hier dat composieten bestaan uit vezelversterkte kunststoffen (polymeren) en eventueel een toegevoegd kernmateriaal, bijvoorbeeld ter isolatie of om het traagheidsmoment van de doorsnede te verhogen of als het product een dikte moet hebben wat met vezelmatten en hars alleen niet mogelijk is. In het geval van biocomposieten gebruikt men meestal polymelkzuur, hout of schimmels als kernmateriaal, hebben de vezels een natuurlijke oorsprong en gebruikt men thermohardende of thermoplastische polymeren met een hoge gehalte aan koolstofatomen die afkomstig zijn uit hernieuwbare planten. Bio-based composiet componenten moeten zijn van:

- organisch materiaal
- koolstof van het organische materiaal moet recent gefixeerde koolstof en geen fossiele koolstof zijn [7], met een te bepalen “bio” gehalte volgens onderstaand schema,

A Biopolymeer Synthetische vezel 30% glas vezel, 70% Biopolymeer; maar 70% organisch	B Biopolymeer Natuur vezel 30% vlasvezel, 70% Biopolymeer;
D Synthetisch polymeer Synthetische vezel Geen bio-gehalte	C Synthetisch polymeer Natuur vezel 30% vlas vezel, 70% olie gebaseerd polymeer (PP bijv.)

Afbeelding 4 Matrix biogehalte

Onder organisch wordt verstaan het gehalte aan koolstofhoudend materiaal. Biogehalte is de hoeveelheid koolstofatomen uit hernieuwbaar materiaal t.o.v koolstofatomen uit fossiel materiaal. Ter verklaring worden twee rekenvoorbeelden gegeven, zie ook [Afbeelding 4](#).

In situatie **A** is een composiet gegeven bestaande uit 30% glas vezel en 70% biopolymeer. Het bio-gehalte is 100%, omdat het glas niet meetelt in de definitie voor biogebaseerd. De juiste notatie moet zijn: 100% bio, maar 70% organisch.

In situatie **C** is een composiet gegeven bestaande uit 30% vlas vezel en 70% petroleum gebaseerd polymeer; bijv. PP (polypropyleen). Het biogehalte wordt hier bepaald door de hoeveelheid groene koolstofatomen, dat wil zeggen koolstofatomen die hun oorsprong niet hebben in fossiele bronnen maar gewonnen zijn uit snel hernieuwbare planten. Daarvoor moet eerst de totale hoeveelheid koolstofatomen berekend worden. Vlas bestaat voornamelijk uit cellulose ($C_6H_{10}O_5$)_n met een gewicht van 162 g/mol. Het aandeel koolstofatomen (6) van het totaal is het gewicht koolstof (atoomgewicht 12 g/mol) ten opzichte van het totale molecuulgewicht: $(6 \cdot 12 / 162) \cdot (\text{fractie vlas in composiet}) \cdot 100\% = 44,4 \cdot 0,3 = 13,32\%$

Polypropyleen wordt tegenwoordig nog steeds uit fossiele bronnen geproduceerd en heeft geen groene koolstoffen. Toch moet het koolstofaandeel berekend worden. PP (C_3H_6)_n heeft een molecuulmassa van 42 g/mol. Het koolstofaandeel is daarmee $(3 \cdot 12 / 42) \cdot (\text{fractie vlas in composiet}) \cdot 100\% = 85,7 \cdot 0,7 = 59,99\%$. De totale hoeveelheid koolstof = $59,99 + 13,32$. Volgens $(\text{biokoolstof/koolstof totaal}) \cdot 100$ is het biogehalte van situatie C: $13,32 / 73,31 \cdot 100 = 18,17\%$.

1 - 5.2 Recyclen van composietmaterialen

Een bijdrage van Alwin Hoogendoorn, Portfoliomanager Onderzoek Centre of Expertise Biobased Economy, Hogeschool Avans & HZ University

1 - 5.2.1 Wereldwijd en regionaal vrijkomende hoeveelheden composietmaterialen

De wereldwijde composieten markt vertegenwoordigt in 2020 naar verwachting een omzet van 75 miljard € [13]. Het gaat hierbij om een wereldwijde jaarlijkse productie van ca. 7,9 miljoen ton aan composietproducten welke voor ca. 90-95% gebaseerd zijn op glasvezels [14]. Uitgaande van bijvoorbeeld een gemiddelde productlevensduur van 20 jaar en 10 - 20% productie-afval [14] zou er grof geschat wereldwijd jaarlijks ca. 1,1 – 1,9 miljoen ton aan potentieel her te gebruiken composietafval moeten vrijkomen.

Biocomposieten vertegenwoordigen een kleinere maar groeiende markt welke voor Europa momenteel wordt geschat op ca. 350.000 ton (aandeel van 15 gew.-% in de totale Europese composieten markt; overig aandeel glascomposieten 80 gew.-% en koolstofvezelcomposieten 5 gew.-%). Een groot gedeelte van de biocomposieten bestaat uit hout gebaseerde biocomposieten terwijl de natuurvezelversterkte kunststoffen door FNR / Nova Instituut [15] worden geschat op omstreeks 92.000 ton aan jaarlijkse productie. Voor vrijwel alle composietproducten geldt momenteel dat er nog geen goede en tevens commercieel aantrekkelijke recycling methoden beschikbaar zijn. Zo gaat het grootste deel van het Belgische afval momenteel naar stortplaatsen [16] terwijl er officieel een stortverbod

in zowel Nederland als ook België bestaat voor post-consumer kunststoffen inclusief composieten.



Afbeelding 5 Enkele van de 25.000 in Nederland nog te slopen zeiljachten [17]

Bekende voorbeelden van moeilijk te recyclen composietproducten zijn de zeilboten (ca. 25.000 zeilboten zouden momenteel in Nederland gerecycled moeten worden [17]). Deze glasvezel-polyester zeilboten worden nu soms in bijvoorbeeld Zeeland illegaal afgezonken en vormen daarmee een milieubelasting. Er wordt tevens berekend dat het wereldwijde aanbod aan te recyclen windturbinebladen zal toegroeien naar jaarlijks ca. 180.000 ton [14]. In België komt er jaarlijks ca. 10.000 ton composietafval vrij [16] (hiervan 4.000 ton productie afval).

1 - 5.2.2 Huidige verwerkingstechnologieën

Veel composietafval wordt, zoals eerder toegelicht, nog gestort. Het is technisch gezien niet zo gemakkelijk en zodoende ook vanuit economisch oogpunt lastig om de veelal heterogene partijen composietafval bedrijfsmatig succesvol te verwerken. Er zijn zodoende wereldwijd maar zo'n 20 bedrijven gespecialiseerd in het upcyclen en verwerken van composietproducten. De huidig door deze bedrijven toegepaste routes zijn onderstaand weergegeven:

Tabel 2 Huidige verwerkingstechnologieën

Methode	Bedrijven	Opmerking
Vermalen	Neocomp (D), CFK Valley Stade (D), Reprocover (B), Extr Ecosolutions (NL)	Toepassen richting cementindustrie vanuit m.n. glasvezelcomposieten
Verbranding		Op kleine schaal soms meeverbranding met grijs afval?
Pyrolyse	ELG Carbon Fibre (UK), KARBOREK (It.)	m.n. terugwinning koolstofvezels, 450 - 700°C
Solvolyse / Chemische recycling	Adherent Tech (V.S.), Innoveox (Fr.)	Hergebruik van vezels en hars mogelijk Oplossing in bijv. DEG met base op 180°C

1 - 5.2.3 Chemische recycling

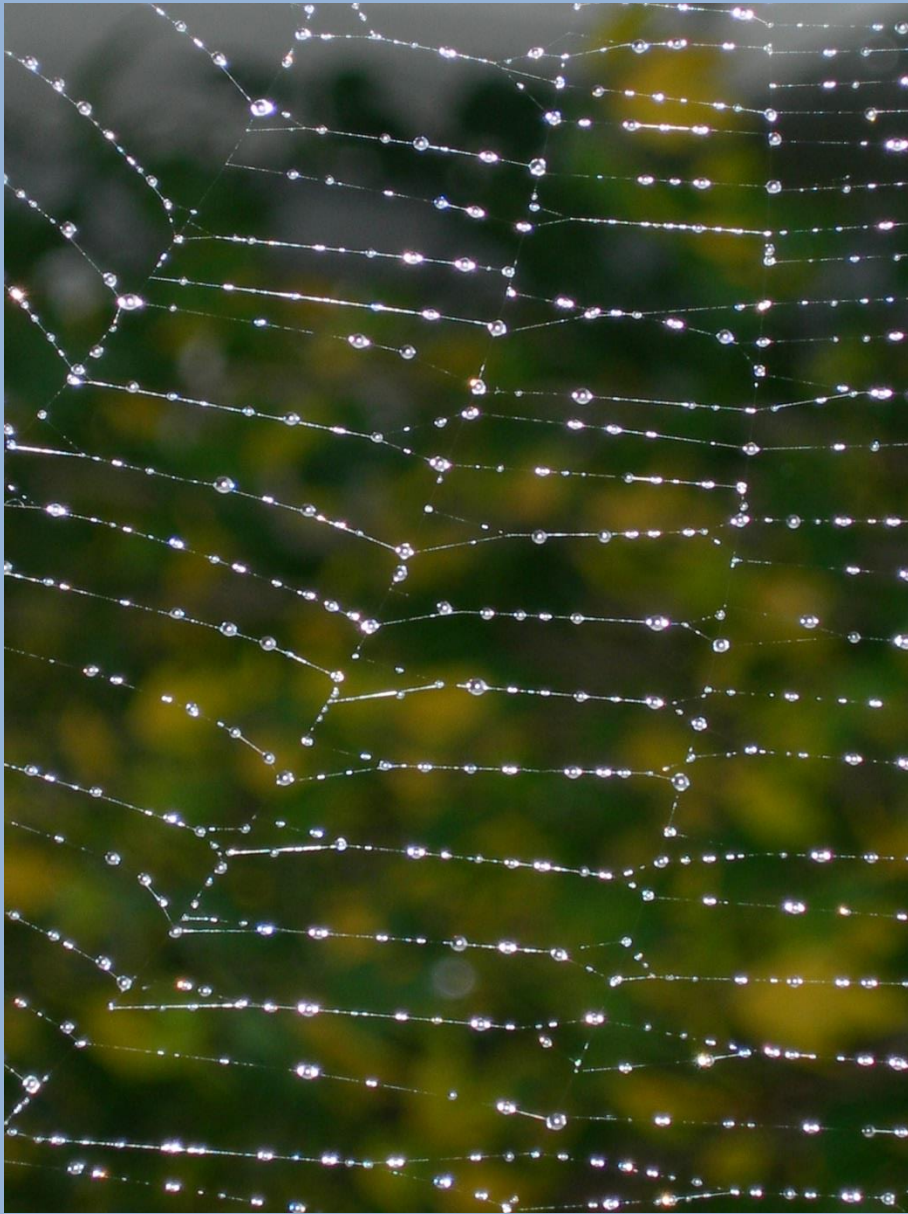
Sita België heeft destijds in 2014 Avans benaderd om te onderzoeken hoe vliegtuigcomposiet onderdelen chemisch gerecycled zouden kunnen worden. Avans heeft destijds deze vraag aangegrepen om zowel te kijken naar de chemische recycling van vlas-biocomposiet als ook de koolstofcomposiet vliegtuigonderdelen.

Juist voor de bio-epoxy en epoxy gebaseerde systemen zijn daarbij oplossingen gevonden om composietmaterialen van dit type te chemisch te kunnen upcyclen (de dure hars lost bij 180 C op in een biosolvent en je krijgt de vlasvezels terug; zie onderstaande figuur). Juist bij het gebruik van dure bio-epoxyharsen (ca. 10-15 €/kg) is het doel van de solvolyse de terugwinning het hergebruik van de epoxyhars. Er zijn verwachtingen dat de herwonnen hars tot 10 gew.-% bijgemengd kan worden in nieuwe harssystemen. Voor die gevallen waar er sprake is van koolstofcomposiet zal de focus al snel meer liggen op het terugwinnen van de koolstofvezels (recyclewaarde ca. 40 €/kg koolstofvezel).

Er zijn ook partijen die nu juist nadenken om bij de harsformulering (d.w.z. de harssamenstelling) alvast chemische verbindingen toe te voegen die later gemakkelijker gedegradeerd kunnen worden (makkelijker los te breken door bijvoorbeeld toevoeging van een zuur en/of warmte). Een voorbeeld hiervoor is het Amerikaanse bedrijf Connora Composites met haar Recyclamine harder [18] welke chemische recycling van epoxyharsen op lagere temperaturen moet mogelijk maken.



Afbeelding 6 Resultaten van solvolyse proeven bij Avans met vlas/bio-epoxycomposiet (foto A. Hoogendoorn)



Spinrag draadjes zijn supersterk. De specifieke sterkte is wek 5 keer zo groot als die an staal. Als daarvan een web gemaakt zou worden van een cm dik en met tussenruimtes van vier cm en dit zou vergroten tot het formaat van een voetbalveld, zou daarmee een vliegende jumbojet kunnen worden tegen gehouden.

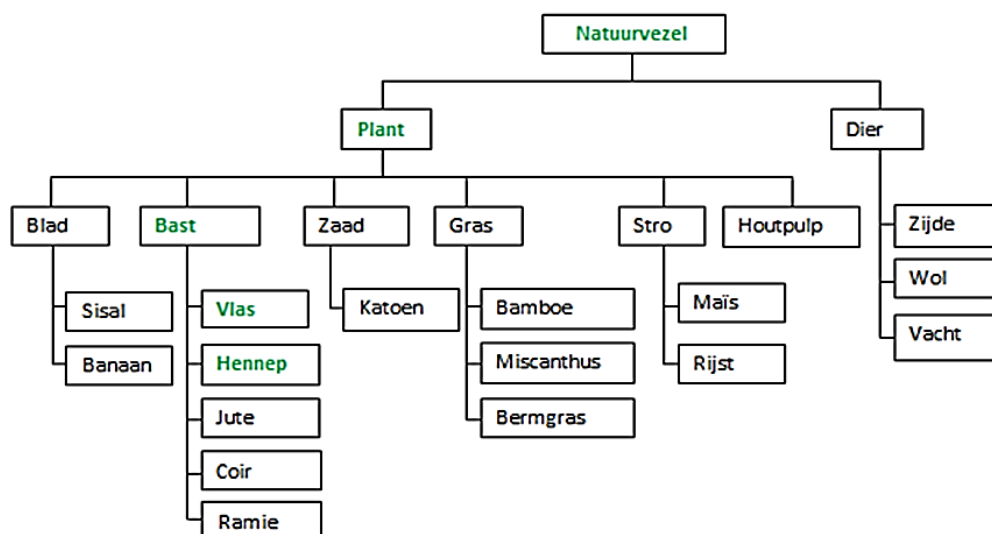
*<http://dekennisvannu.nl/site/artikel/Spinrag-als-wondermateriaal/4751><https://gervanpoelgeest.wordpress.com/2011/02/11/het-ontwerp-van-een-spinneweb/>
(Foto: Astrid Griffioen)*

Hoofdstuk 2

De Bio-vezel

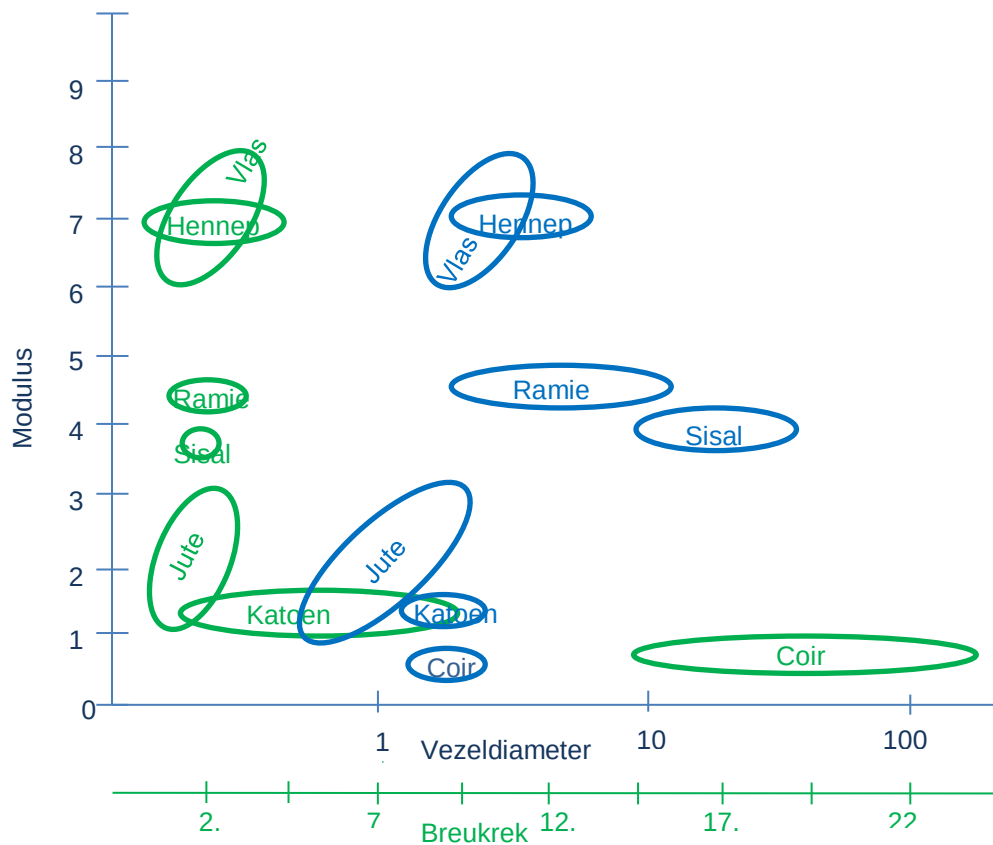
Na het lezen van dit hoofdstuk ben je bekend met bio-vezels. Je weet hoe ze gewonnen worden, wat voor eigenschappen zij hebben, en wat er aan deze eigenschappen ten grondslag ligt. Je leert waarop bij het werken en ontwerpen met bio-vezels gelet moet worden.

Er zijn talrijke overzichtsartikelen over biovezels en de verwaarding van vezels te vinden [19], [20], [21], [22]. In composieten worden de vezels in vorm van textiel gebruikt. Er bestaan vezelviltmatten van korte vezels, vezelweefsels en textielen met vezels in één, uni-directionele, richting. Het is bekend dat hennepvezels, bamboe vezels en vlasvezels de sterkste vezels zijn. Echter – alleen van de vlasvezel zijn de voor structureel belastbare constructies zo belangrijke UD matten beschikbaar. Om die reden zal in dit kader alleen de principes van biovezels in biocomposieten met vlas als studievoorbeld en de aandachtspunten met betrekking tot zwakke punten van biovezels besproken worden. Afbeelding 7 geeft de indeling van natuurlijke vezels [10].



Afbeelding 7 Vereenvoudigd schema: indeling naar oorsprong van natuurlijke vezels

Een vergelijk vezeldiameter en breukrek tegen E-modulus tussen de vlas, hennep, sisal, ramie, katoen, coir (kokos) en jute geeft het volgende beeld [23]. Hieruit wordt snel duidelijk dat vlas en hennep constructief gezien de beste eigenschappen hebben en daarmee de keuzevezels zijn voor een brug.



Afbeelding 8 Vezelcriteria

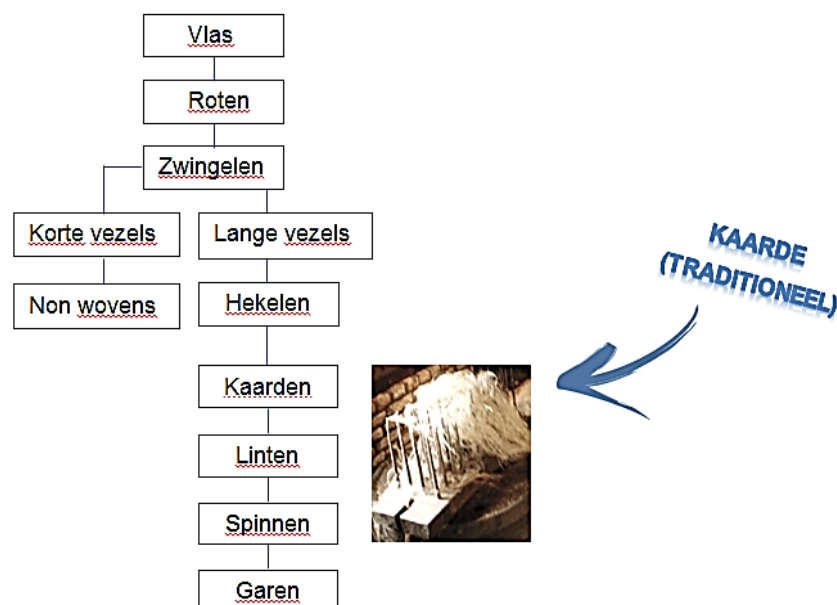
2 - 1 Vezelverwaarding in Nederland

De kunst van het verwerken van natuurlijke vezels is het zo goed mogelijk scheiden van de houtkern en de bastvezel. Hoe schoner de vezel uit het proces komt, des te hoger is de kwaliteit van de vezel.

2 - 1.1 Vlas en hennep

De planten worden met wortel en al uit de grond getrokken om een zo lang mogelijke vezel te verkrijgen. Na het oogsten van het gewas worden de stengels op de akker in een 'zwad' gelegd, waar de bastvezels door inwerking van regen en dauw worden losgemaakt ("roten"). Het pectine, dat als lijm fungeert, wordt op deze manier losgeweekt. Tijdens dat proces worden de stengels regelmatig door een machine omgekeerd. Als men de stengels voldoende heeft laten 'roten', worden ze door een balenpers tot vierkante balen geperst, naar een droge plek getransporteerd en voor verdere bewerking opgeslagen [24].

In het machinale zwingelproces wordt het hout van de vezel verwijderd en komt de zachte lange vezel vrij. In het overschot bevinden zich korte vezels die in een zuiveringsproces vrij komen. Na het zwingelen wordt gehekeld. Hierbij worden de dikke vezelbundels open geregen tot dunnere vezelbundels. De lange vlasvezels worden gekaard en gekamd om ze geschikt te maken voor het spinnen van fijne garens waarbij alle vezels in dezelfde richting komen te liggen.



Afbeelding 9 Schematische weergave van het verwerkingsproces vlas en hennep

De fijnste lange vezels worden op natspinmachines met warm water tot garens met verschillende diktes en gewichten gesponnen die door het gebruikte water zoveel cohesie hebben gekregen, dat ze meteen geschikt zijn om als ketting te worden gebruikt [25], [26], [27], [28]. Afbeelding 10 laat de verwerking van korte stukjes garen tot een viltmat zien. Texperium in Haaksbergen verwerkt op deze manier niet alleen oud textiel maar ook vlas en hennep. Een proef om maaisel tot een viltmat te verwerken heeft nog niet tot het gewenste resultaat geleid [29].

De vezels komen allen uit de regio rondom Schiphol. Hennep en vlas worden op Schiphol verbouwd, gemaaid en door het bedrijf Hempflax verwerkt tot verschillende vezelproducten, waarbij hennep alleen als vezelmat en vlas tevens als UD en weefselmatten te verkrijgen zijn.

Vlas is verkrijgbaar in de vorm van matten, gewoven en non-wovens, terwijl hennep op dit moment nog alleen als non-wovens op de markt is. Veel onderzoek is gaande op het gebied van het gebruik van groen-afval in composieten, zoals maaisel of tomatenstengels. State-of-art (bijvoorbeeld bij de bedrijven Millvision en Newfoss) is dat deze vezels worden gehakseld en in het spuitgietproces als versterking worden meegespoten. Het is op dit moment nog niet mogelijk om er UD of gewoven vezelmatten van te maken waardoor een toepassing in structureel belastbare constructies niet overwogen kan worden.



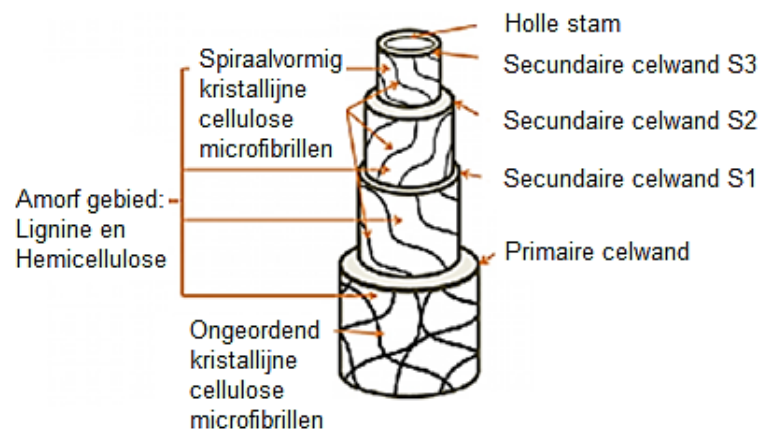
Afbeelding 10 Vezelverwerkingsmachines bij Texperium in Haaksbergen

(Foto's Katrin Tazelaar met vriendelijke toestemming van Texperium)

2 - 2 Vezelopbouw

Natuurlijke vezels vertonen een hoge spreiding in hun eigenschappen. De reden daarvoor is gelegen in de verschillende vezelsamenstelling en -structuur, zoals de hoek van de microfibrillen, de kristalliniteit of fouten die ontstaan zijn tijdens het groeiproces, afhankelijk van de locatie van de oorspronkelijke plant en de locatie van de vezel in de plant. Zo hebben vezels uit het midden van de stam betere mechanische eigenschappen [30].

Vlasvezels, net zo als hennep en jute behoren tot de familie van bastvezels. De vezels bevinden zich in de stengel van de plant. De holle stam bestaat onder andere uit merg en een buitenwand, die een dertigtal lange vezelbundels bevat, die de technische vezels genoemd worden. De technische vezels hebben een diameter van 50 à 100 µm en zijn ongeveer 1 meter lang. Iedere bundel is opgebouwd uit 10 à 40 elementaire vezels, met een lengte van 2 tot 5 cm en een diameter van 10 tot 20 µm. Alle elementaire vezels hebben een complexe structuur, bestaande uit een primaire en drie secundaire celwanden. De primaire celwand bestaat voornamelijk uit cellulose en de secundaire celwanden bevatten voornamelijk lignine, doortrokken van spiraalvormige microfibrillen van lange cellulose ketens die verantwoordelijk zijn voor de mechanische eigenschappen van de vezels. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de celwanden S1, S2 en S3 omdat het verschillende lagen zijn. De opbouw echter lijkt zo op elkaar dat het allemaal secundaire celwand wordt genoemd.

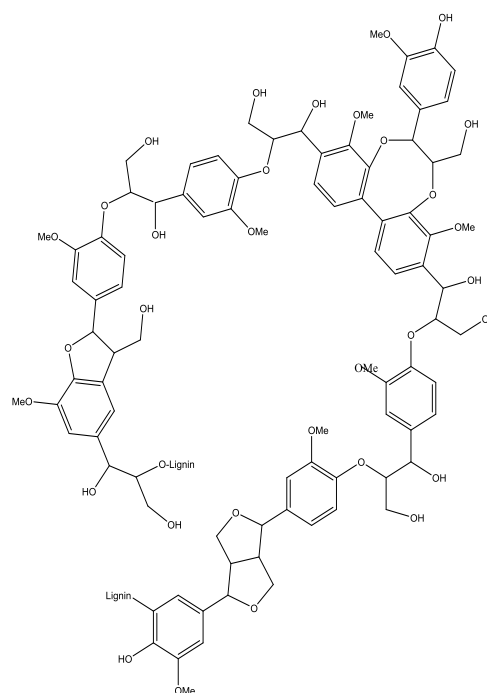


Afbeelding 11 Opbouw plantenvezel, bewerkt uit [31]

Lignine en cellulose zijn verbonden net als matrix en vezel, waarbij cellulose als vezelcomponente de krachten op neemt. Lignine en pectine zijn minder sterke en stijve polymeren. Vlas bevat het minst lignine van alle natuurlijke vezels, wat verklaart waarom de mechanische eigenschappen van vlas hoger zijn dan die van andere natuurlijke vezels, mits onbewerkt [32]. Vaak wordt lignine uit plantenvezels gehaald om betere eigenschappen te bereiken. Experimenten laten zien dat de eigenschappen inderdaad verbeteren na verwijdering van lignine. Dit effect is niet zichtbaar bij vlas [33]. Lignine fungeert als een soort matrixpolymeer tussen de vezelbundels. Vlas bevat al weinig lignine en na extractie van lignine uit vlas is de samenhang tussen de elementaire vezels eruit gehaald waardoor de

eigenschappen weer verminderen [34], [35]. Om die reden wordt lignine niet expliciet uit vlasvezels verwijderd.

Lignine bevat veel aromatische groepen die het voordeel hebben water afstotend te zijn. Aromaten zijn echter gevoelig voor radicaal processen waardoor de gevoeligheid voor UV straling toeneemt naarmate er meer lignine aanwezig is. Natuurlijke vezels zijn gevoeliger voor temperatuur dan glas of koolstof. Zo mag bij het verwerken van natuurlijke vezels een temperatuur van 160-200°C niet overschreden worden omdat de vezel dan aangetast wordt. Dat betekent dat niet elk matrixmateriaal kan worden gebruikt. Een vezel heeft één externe wand en drie dikke zijwanden. Hoe meer parallel de microfibrillen liggen met de as van de vezel, des te beter de mechanische eigenschappen zijn. Deze vezels, bestaande uit cellulose zijn ingebed en worden bijeen gehouden door een natuurlijke lijm van lignine, pectine en hemicellulose [36].



Afbeelding 12 Lignine molecuul

Hemicellulose bestaat uit enkele verschillende monosachariden. In tegenstelling tot cellulose dat uit 7.000 tot 15.000 glucosemoleculen per polymeer bestaat, wordt hemicellulose door kortere ketens van 500 tot 3000 suikereenheden gevormd. Bovendien is hemicellulose een vertakt polymeer, terwijl cellulose deels onvertakt, deels vertakt is. Dat maakt hemicellulose eerder tot een matrixpolymeer terwijl de onvertakte, veel langere cellulose als vezel fungeert en betere mechanische eigenschappen heeft. Hemicellulose is voor veel micro-organismen makkelijker verteerbaar dan cellulose; eventuele houtrot begint vaak met een aanval op de hemicellulose omdat hier veel 'vrije' suikers aanwezig zijn zodat organismen op deze manier snel aan een voedselbron kunnen komen. De chemische samenstelling (het cellulose gehalte) en de oriëntatie van de ketens bepalen de mechanische eigenschappen. Tevens is de verhouding tussen de lengte van een vezel en de diameter van de vezel een belangrijke factor.

Tabel 3 Gehalte Cellulose, Hemicellulose en lignine van natuurlijke vezels

Vezel	Cellulose [wt%]	Hemicellulose [wt%]	Lignine [wt%]
Vlas	62 – 72	18,6 - 20,6	2 – 5
Hennep	68 - 74,4	15 - 22,4	3,7 – 10

Samengesteld uit volgende bronnen: [37]; [38]; [39]; [40]; [41]; [42]; [43]; [10]

2 - 3 **Vezeleigenschappen**

Natuurlijke vezels worden uit verschillende planten gewonnen. De planten verschillen van elkaar en de mechanische eigenschappen kunnen sterk variëren van de ene soort naar de andere. Dat ligt aan de verschillen in de verhouding van de hoeveelheid cellulose, hemicellulose en lignine en andere eigenschappen van de plantvezels, zoals de grootte en de structuur van de cellen.

2 - 3.1 **Mechanische eigenschappen**

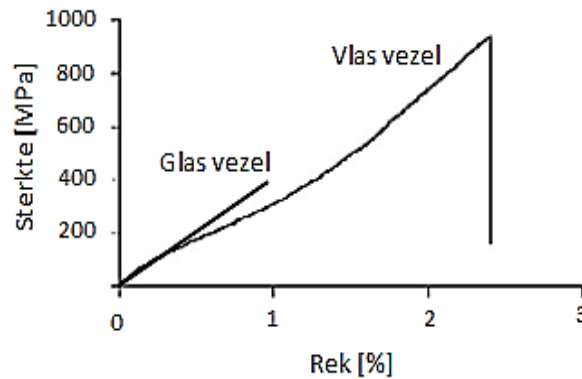
De grote hoeveelheid holtes in de vezels zorgt voor hoge specifieke sterktes en stijfheden omdat de dichtheid laag is. De sterkte van een vezel is daarmee afhankelijk van de kristalliniteit. De kristalliniteit hangt tevens af van de hoeveelheid cellulose, de hoek van de microfibrillen, de temperatuur, de aanwezigheid van fouten, het vochtgehalte en de vezeldiameter. Hoe kleiner de vezeldiameter hoe hoger de stijfheid en de sterkte van de vezel. Natuurlijke vezels worden soms als enkele vezels, oftewel elementaire vezels, getest en soms als vezelbundels [44], [30], [45], [46]. In het algemeen zijn de eigenschappen van elementaire vezels beter dan die van vezelbundels. In de meeste composiet applicaties worden toch bundels genomen waarin de elementaire vezels overlappen, door lignine gebonden worden en samen een sterke bundel vormen.

Tabel 4 Mechanische eigenschappen van natuurlijke vezels

Vezel	Dichtheid [kg/m³]	E Modulus [GPa]	Sterkte [MPa]	Specifieke stijfheid [MPa m³/kg]	Rek [%]	Lengte [mm]
E glas	2500 – 2590	70 – 85	1400 - 3500	28-34	1,8 - 4,8	Continu
Vlas	1400 - 1500	50 – 90	500 - 1100	35,7-59,2	1,2 - 3,3	5 – 900
Hennep	1470 - 1520	30 – 70	400 - 920	20,3-46,7	1,4 - 4	5 – 1000

Samengesteld uit volgende bronnen: [41], [10], [39], [38], [37], [40], [42], [43]

Er is een ander significant verschil met glasvezels. Natuurlijke vezels zijn in eerste instantie niet zo gericht als glasvezels. De microfibrillen arrangeren zich bij een opgelegde kracht tot een hogere kristalliniteitsgraad wat leidt tot betere mechanische eigenschappen [47] [48] [49]. Afbeelding 13 laat door het niet-lineaire gedrag duidelijk zien dat vlas met toenemende belasting stijver en sterker wordt.



Afbeelding 13 Niet-lineair spanning-rek diagram van vlas vezels, naar [50]

Samengevat is de hoge spreiding van eigenschappen te verklaren door verschillen in vezellengte, verschillende samenstelling van de vezel en het vochtgehalte, waarbij het verschillende gebruik van test methodes of conditionering een extra factor is, zoals het relatieve vochtgehalte, de temperatuur en de test snelheid [49].

2 - 3.2 Waterabsorptie vezel

De buitenste celwand is waterdoorlatend en bevat hydrofiele, dat wil zeggen 'waterminnende', koolhydraten zoals hemicellulose (je kunt dit vergelijken met huis-, tuin- en keukensuiker, dat ook water aantrekt). Door deze combinatie van waterdoorlatendheid en aantrekking van water zwellen de natuurlijke vezels in een vochtige omgeving op. De zwelling van de vezels veroorzaakt krachten in de celwand. De ontstane druk door zwellen van de lignocellulosevezels door de opname van water is zeer hoog. In de oudheid werd deze druk gebruikt om stenen mee te slijten [51].

Vezels die een grotere hoeveelheid hemicellulose bevatten zwellen méér in een vochtige omgeving. De hoeveelheid geabsorbeerd water hangt verder nog af van de relatieve vochtigheid in de omgeving, de zuiverheid van de cellulose en de graad van kristalliniteit. In bastvezels ligt het vezelsverzadigingspunt op ongeveer 20% (massaprocent). De cellulosevezels zijn spiraalvormig geordend. Het opzwellen van de vezel door vocht is groter loodrecht op de vezel dan in vezelrichting. Natte vezels hebben een grotere sterkte en hogere breukrek dan droge vezels. Door het vocht wordt de cellulose van de vezel meer kristallijn georiënteerd waardoor de kristalliniteit verhoogd wordt. De rek wordt verhoogd doordat water als smeermiddel werkt waardoor de vezels verder langs elkaar heen kunnen glijden [52].

In een bio-composiet treedt door het zwellen van de vezels degradatie van de vezel-matrixpolymeer hechting op. In [32] wordt beschreven dat door het ontstaan van mechanische spanning rond om de opgezwollen vezels microscheurtjes in de matrix optreden. Moleculen in de celwand van natuurlijke vezels die oplosbaar zijn in water, verlaten in opgeloste toestand de celwand en diffunderen door het matrixpolymeer langs de microscheurtjes. Uiteindelijk kan de hechting tussen vezel en matrixpolymeer volledig

bezwijken. Samengevat kan wateropname van de vezel leiden tot beperkingen voor toepassingen van natuurlijke vezels, door:

- Verandering van afmetingen (opzwellen)
- Verminderd verspreiden van belastingen in composieten door degradatie matrix-vezel hechting

2 - 3.3 Schimmels

Hemicellulose kan door micro-organismen beter worden afgebroken dan cellulose. Vezels met een hoger gehalte hemicellulose zijn daardoor gevoeliger voorschimmels dan vezels met een lager gehalte hemicellulose. Een aangetaste vezel heeft slechtere mechanische eigenschappen dan een gezonde vezel. In de literatuur worden verslechtingen van 50% van de oorspronkelijke sterkte en stijfheid gerapporteerd. Ook de wateropname wordt nog eens verhoogd met ca. 12% [41], [52], [53]. De slechte weerstand tegen schimmel kan voor problemen zorgen bij opslag of verwerking onder vochtige omstandigheden.

2 - 3.3.1 Vezelvoorbehandeling voor de hechting met de matrix

Zoals eerder aangehaald, hangen de eigenschappen van composieten af van de individuele componenten en van de onderlinge samenhang ervan. De mate waarin de spanningsoverdracht en verdeling van de last efficiënt gebeurt, hangt af van de adhesie tussen beide componenten. De meeste natuurlijke vezels hebben een poreuze structuur wat een belangrijke factor kan zijn bij de verzadiging met bijvoorbeeld hars. Afhankelijk van de chemische samenstelling van het polymeer en de vezels hechten deze wel of niet goed aan elkaar. Natuurlijke vezels hebben bijvoorbeeld veel hydrofiele groepen in de moleculaire opbouw. Een polymeer met soortgelijke opbouw zal goed op de vezel hechten. Voor andere polymeren hebben de vezels een hechtmiddel, genoemd sizing, nodig. Daarom wordt een coating, meestal een coupling agent, aangebracht op de vezel om zo een binding tussen de vezel en de matrix mogelijk te maken. Bijkomend voordeel is dat door deze aangebrachte sizings de wateropname duidelijk vertraagd wordt. Een bekende vezelcoating is maleinzuuranhydride polypropyleen (MAPP). Door het hydrofobe polypropyleen wordt enerzijds de waterresistentie verhoogd en anderzijds de mogelijkheid om de polaire vezel te koppelen aan een apolair polymeer zoals polypropyleen. Behandeling met silanen en het koppelmolecuul lysine-diisocyaanaat (LDI) leveren een soortgelijk effect [32].

Alkalisatie

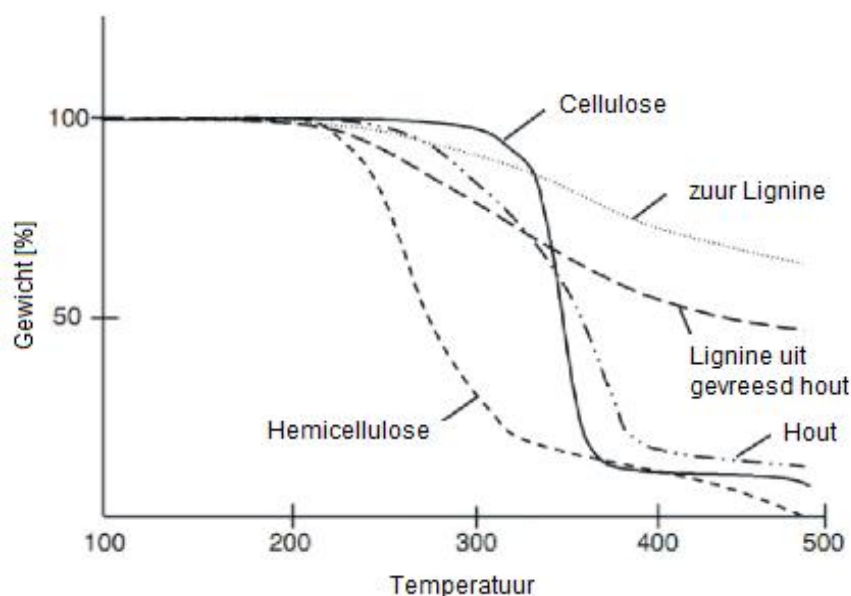
Een speciaal geval van vezelvoorbehandeling is alkalisatie. Door toevoegen van kaliumhydroxide (KOH) of natriumhydroxide (NaOH) ontstaat een reactie met de vrije OH-groepen van cellulose, waardoor de aanbinding door watermoleculen verhinderd wordt. Dit is echter alleen van voordeel tegen wateropname en draagt niet bij aan de vezel-matrix hechting [33].

2 - 3.4 Impact door ultraviolette straling

Ultraviolette straling veroorzaakt radicaalreacties in ketens. Aromatische ketens zijn daarvoor relatief gevoelig en lignine is daarom minder goed bestand tegen UV straling dan de andere celwandpolymeren cellulose en hemicellulose [32].

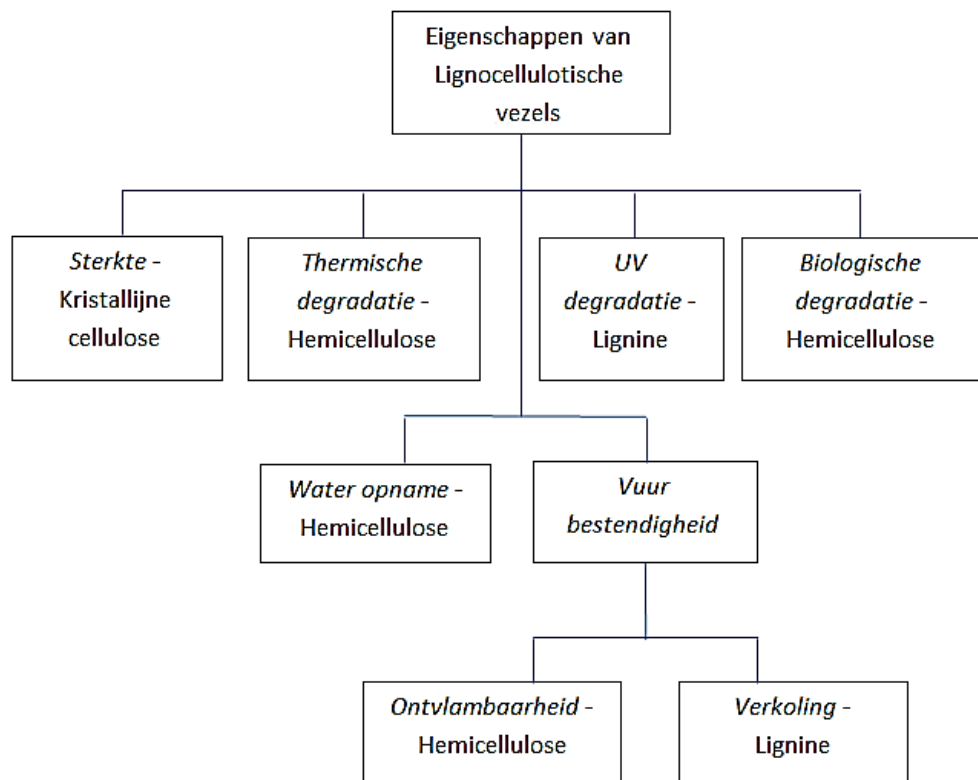
2 - 3.5 Brandbaarheid en thermische degradatie

Brandgedrag van natuurlijke vezels wordt bepaald door de verhouding tussen cellulose, hemicellulose en lignine. Meer cellulose zorgt voor verhoogde brandbaarheid; meer lignine voor hogere verkoling. In het algemeen kan de weerstand tegen vuur verhoogd worden door de aanwezigheid van silica of as.



Afbeelding 14 Thermografische decompositie van natuurlijke vezels, ontleend uit [118]

De moleculaire structuur heeft eveneens invloed op de weerbaarheid tegen vuur. Hoge kristalliniteit en lage polymerisatie-graad verhogen de weerstand. Aromatische, fenolische groepen zoals in lignine geven hoge weerstand tegen brand, weinig rook en hebben een vertragende werking. Een uitwendige laag houtskool beschermt de kern van de vezel. Daarentegen zijn lignine houdende vezels gevoelig voor thermische degradatie. De relatief zwakke bindingen van hemicellulose breken al bij lagere temperaturen af en de sterke bindingen in de aromatische ringen van Lignine pas bij hoge temperaturen, zie afbeelding 14. Hoe minder hemicellulose des te beter de vezel bestand is tegen thermische decompositie. Afbeelding 15 geeft schematisch alle afhankelijkheden weer.



Afbeelding 15 Afhankelijkheden eigenschappen van samenstelling



Hy-Fi toren van de architecten 'The living'. In 2014 in New York lokaal geproduceerd, is de toren een zo goed als verspillingsloze biostructuur. De toren bestaat uit 10000 blokken gemaakt van mycelium.

Hoofdstuk 3

Kernmaterialen

Kernmaterialen zijn noodzakelijk om composieten structuren met een bepaalde dikte te bereiken. Normaal gesproken kunnen veel materialen als kern fungeren want de structurele bijdrage is beperkt tot compressieweerstand. Echter – voor bio-based composieten is de keuze beperkt. In dit hoofdstuk maak je kennis met een volledig nieuw concept.

In de literatuur zijn veel voorbeelden gegeven voor kernmaterialen in composieten constructies. Doorgaans worden deze sandwichpanelen gebruikt omwille van de compressie eigenschappen van het materiaal, om druk op te nemen. In aanvulling op die door [12] genoemde kunststofschuimen, (balsa)hout, kurk en honingraat als mogelijke kernmaterialen zijn hier de bio-based schuimen van polymelkzuur (PLA) en de nieuwe ontwikkeling mycelium te noemen.



Afbeelding 16 Voorbeelden van een typisch kernmateriaal (PLA, links) en een atypisch, nieuw kernmateriaal (fungiblok, rechts)

Omdat de schimmel als (bouw)materiaal nieuw is, wordt in het vervolg aandacht besteed aan de ontwikkeling en de eigenschappen daarvan.

3 - 1 Mycelium composiet

Een bijdrage van Davine Blauwhoff, Junior Onderzoeker voor het Centre of Expertise Biobased Economy, Hogeschool Avans & HZ University

Een van de innovatieve richtingen binnen bio-based materiaalonderzoek, is het ontwikkelen van myceliumcomposiet als materiaal [54], [55], [56]. Vergeleken met olie gebaseerde materialen heeft mycelium (zwamvlok van een schimmel) veel potentie, omdat het slechts uit biomassa bestaat en daardoor snel afbreekbaar is. Gezien deze eigenschap, biedt dit nieuwe materiaal kansrijke mogelijkheden.

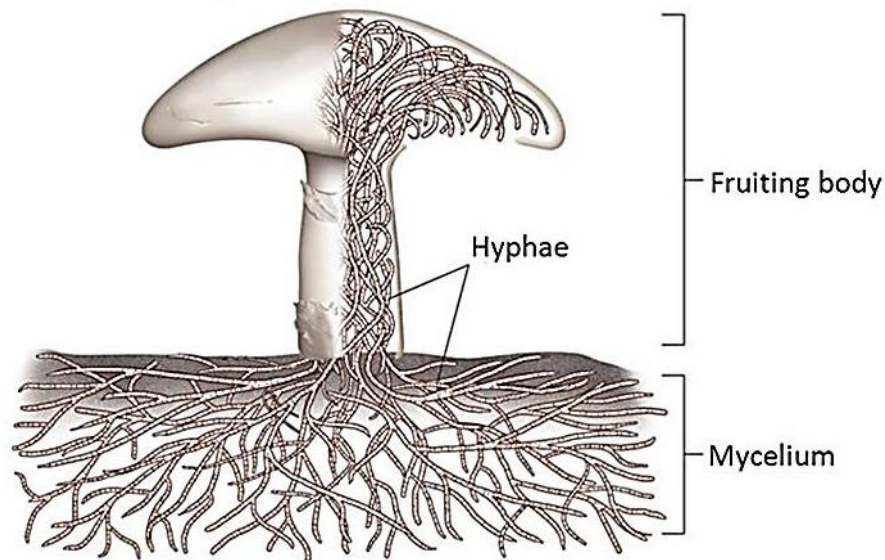
In de bouw worden veel olie gebaseerde en niet-afbreekbare materialen gebruikt, wat een grote aanslag is op de voorraad grondstoffen en het milieu. Daarom wordt er in deze industrie steeds meer gefocust op het gebruik van bio-based materialen [57], [58]. Myceliumcomposieten kunnen hierom een interessante oplossing zijn voor de bouw, denk aan isolatiemateriaal, als kern van sandwichpanelen of mogelijk als vervanger van bakstenen en/of cellenbeton.

Naast dat het een bio-based product is, wordt het ook geproduceerd in een circulair proces. Organische afvalstromen of bijproducten, bestaande uit een hoog lignine- of cellulosegehalte, kunnen worden gebruikt als substraat. De productie van landbouwproducten bestaat over het algemeen uit parallelle stromen organisch afval, die vaak eindigen als compost. Voor MKB-bedrijven (gerelateerd aan landbouw) is dit een interessante mogelijkheid om hun afvalstroom te hergebruiken en mogelijk upcyclen, om zo een circulair systeem te creëren.

3 - 1.1 Oorsprong

Schimmels zijn levende organismen en behoren tot een bepaalde klasse in het biologische stelsel. De systematische organisatie en categorisatie van organismen staat bekend als de taxonomie. Levende organismen worden geclassificeerd in drie verschillende domeinen: bacteriën, archaebacteriën (archaea) en eukaryoten. Schimmels, net als mensen, behoren tot de eukaryoten [59].

Het rijk van de schimmels is groot en divers en kan verder onderverdeeld worden in verschillende stammen. Van al deze stammen is er één interessant voor de mycelium-gebaseerde materialen, namelijk de basidiomycota. Deze schimmels zijn in staat om veel langere en veel complexere organische structuren dan andere schimmelstammen te creëren. Basidiomycota, zijn opgebouwd uit hyfen (schimmeldraden) en worden voornamelijk gekweekt om hun 'vruchtlichaam' ook wel bekend als de paddenstoel (i.e. champignons). Mycelium is het vegetatieve deel van de paddenstoel en is de naamgeving voor het ondergrondse) netwerk van hyfen, afbeelding 17.



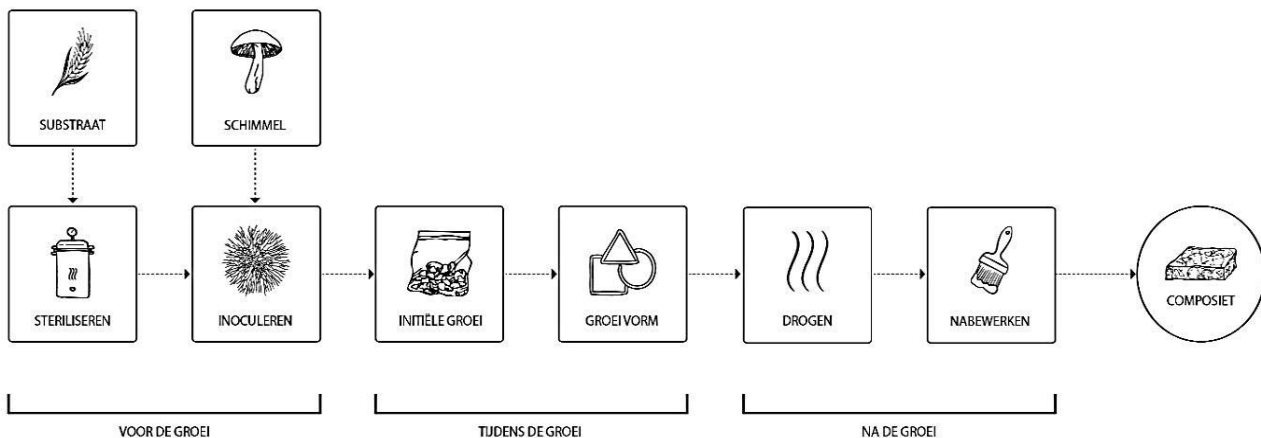
Afbeelding 17 Structuur van een stereotype schimmel [60]

De basidiomycota bezitten twee belangrijke karakteristieken die hen aantrekkelijk maken voor het creëren van mycelium-gebaseerde materialen, namelijk septa en anastomose. Een septum is een interne wand, waarmee de cellen van een schimmel van elkaar worden gescheiden en is gemaakt van chitine. Een septum kan dwars (transversaal) of in de lengterichting (longitudinaal) lopen. Septa hebben een opening die afgesloten kan worden, waardoor deze bij onderbreking maar een beperkte schade en verlies van voedingsstoffen veroorzaakt. Septa zijn een belangrijk kenmerk voor mycelium-gebaseerde materialen, omdat ze de robuustheid van het mycelium verhogen. De tweede belangrijke eigenschap is anastomose. Anastomose is het vermogen van twee verschillende hyfen om samen te smelten wanneer zij elkaar tegenkomen. Anastomose is cruciaal voor het creëren van een snel groeiend mycelium, wanneer de creatie van grote netwerken wordt toegestaan. Een ander voordeel van de anastomose is dat het leidt tot een sterker mycelium. Omdat alle hyfen met elkaar zijn verbonden, is de resulterende massa veel samenhangender en in staat om spanningen efficiënter te verspreiden dan mycelium zonder anastomose [59].

Een mycelium-gebaseerd materiaal is een composiet bestaande uit een natuurlijke versterker of vuller, zoals hennepvezels, en een binder: het mycelium van een schimmel. Mycelium groeit goed op lignocellulose biomassa waarbij het zich als een driedimensionale matrix bindt aan het substraat en alle deeltjes bij elkaar houdt. Schimmels kunnen tot wel 45% uit chitine bestaan, de rest zijn eiwitten en polysachariden [61]. Voor het maken van een myceliumcomposiet, kunnen verschillende type schimmels worden gebruikt die tot de basidiomycota behoren. Van het Elfenbankje (*Trametes versicolor*) en de Oesterzwam (*Pleurotus ostreatus*) is bekend dat ze mycelium met een hoge dichtheid produceren en dat ze snel en gemakkelijk groeien [59]. Ook de Reishi paddenstoel (*Ganoderma lucidum*) is een geschikte variant om te gebruiken voor het produceren van myceliumcomposiet [62].

3 - 1.2 Productie, Proces en variabelen

Het maken van myceliumcomposieten bestaat uit een aantal verschillende stappen. Gebaseerd op het natuurlijke groeiproces van paddenstoelen begint het met de ruwe materialen: een type paddenstoel en een substraat (i.e. voedingsbodem). Dit substraat moet eerst gesteriliseerd worden om te voorkomen dat er andere schimmels en/of bacteriën op gaan groeien. Om het groeiproces te initiëren wordt het substraat geïnoculeerd (i.e. enten) met het desbetreffende type paddenstoel. Het mycelium kan dan langzaam het substraat koloniseren, waarbij het gebruik maakt van de voedingsstoffen in het substraat om te groeien. Wanneer een specifieke vorm van de composiet gewenst is, kan deze na volledige kolonisatie (ongeveer 14 dagen) overgebracht worden naar een mal. Na de groei moet het materiaal worden gedroogd om mede daarbij de schimmel te doden. Als laatste zou er een nabewerking in de vorm van een coating kunnen worden aangebracht, maar dit is in eerste instantie niet noodzakelijk om een myceliumcomposiet te krijgen. In [Afbeelding 18](#) is een schematische weergave gepresenteerd van dit proces.



Afbeelding 18 Schematische weergave van het productie proces van myceliumcomposiet.
Afgeleid van [54]

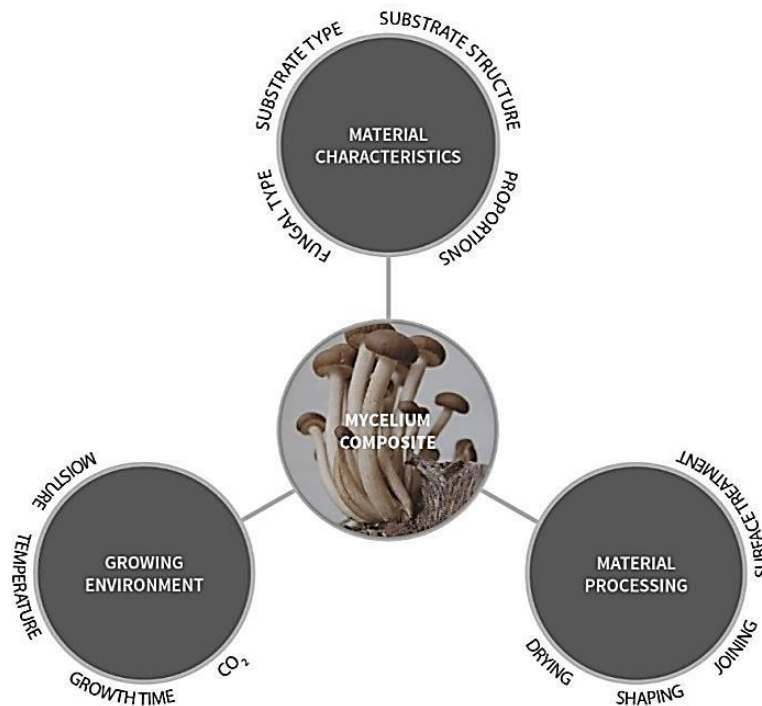
Deze stappen kunnen worden onderverdeeld in drie fases: i) vóór de groei, ii) tijdens de groei en iii) na de groei. Aan de hand van de verschillende fases zijn er enkele variabelen die invloed hebben op de uiteindelijke eigenschappen van het materiaal.

Vóór de groei zijn dat: type paddenstoel en substraat, en structuur en verhouding van het substraat belangrijk zijn.

Tijdens de groei zijn de parameters vocht, temperatuur, CO₂ gehalte en groeitijd van essentieel belang. Zonder vocht kan een paddenstoel niet groeien, maar temperatuur en groeitijd zijn meer variabel.

Na de groei kan het materiaal meteen gedroogd worden of eerst nog verder vorm gegeven in bijvoorbeeld mallen of door gebruik te maken van verwarmde persen. Aanvullende bewerkingstechnieken die toegepast kunnen worden zijn 'verbinden' en oppervlaktebehandeling.

Afbeelding 19 geeft een overzicht van de drie fases van het productie proces en de bijbehorende variabelen. Alle variabelen samen bepalen de eigenschappen van het materiaal. Wanneer een van deze variabelen verandert, zal dit invloed hebben op het resultaat. Enkele parameters zijn essentieel en minder variabel (i.e. vocht), waarbij andere een veel grotere diversiteit kunnen hebben (i.e. substraat). Zo zal de een ook meer invloed hebben op de materiaal eigenschappen dan de ander.



Afbeelding 19 Overzicht van de variabelen die invloed hebben op de materiaal eigenschappen.
Afgeleid van [54]

3 - 1.3 State of the art

Op de markt zijn er al verschillende spelers actief op het gebied van mycelium gebaseerde materialen. Zo maakt een Amerikaans bedrijf, Ecovative Design, een lichtgewicht verpakkingsmateriaal, vergelijkbaar met geëxpandeerd polystyreen [63]. Door het materiaal na het productieproces in een oven te drogen (boven 60°C), kan het ook zonder problemen naar het buitenland verstuurd worden (waar vaak strenge eisen gelden over het meenemen van levende organismen).

Mycelium composiet wordt ook steeds meer ontdekt door kunstenaars en architecten. In 2014 is er in New York een toren, genaamd Hy-Fi, van mycelium blokken gerealiseerd door Architect David Benjamin [64]. Andere bekende namen in dit domein zijn Philip Ross (Mycoworks), Maurizio Montalti (Officina Corpuscoli) en Eric Klarenbeek. Philip Ross is een van de eerste creatieve wetenschappers op het gebied van mycelium. Hij maakte onder andere Mycotecture Alpha (2009), een theehuisje van mycelium blokken, en is continu bezig met het onderzoeken en verder ontwikkelen van het materiaal [65]. Vanuit een meer kunstzinnig perspectief heeft ontwerper Eric Klarenbeek een stoel gemaakt met behulp van

3D printen en creëert Maurizio Montalti wat meer alledaagse producten, variërend van vazen en plantenpotten tot schalen en kommen [66], [67]. Gezien deze voorbeelden leent het mycelium zich goed voor het maken van verschillende producten en bouwelementen. Het materiaal is licht, sterk en bevat ingesloten lucht, wat duidt op mogelijk goede constructieve, isolerende of geluiddempende eigenschappen. De ontwikkeling van dit materiaal zit nog in een beginnende fase en biedt daarom veel mogelijkheden voor verder onderzoek, in het specifiek voor de bouw industrie.



Afbeelding 20 *Verpakking – Ecovative; Hy-Fi – David Benjamin; Mycotecture – Philip Ross; Mycelium stoel – Eric Klarenbeek; Schalen – Maurizio Montalti.*

3 - 1.4 **Materialeigenschappen**

Om een beter beeld te krijgen van de eigenschappen van het myceliumcomposiet zijn er door verschillende partijen materiaal testen uitgevoerd. Aangezien er nog geen norm bestaat voor een natuurlijk composiet schuim is het lastig om eenduidige eigenschappen te bepalen. Ecovative heeft een uitgebreid overzicht van de materiaal eigenschappen van het “Mycofoam”, maar heeft de specifieke variabelen gepatenteerd. Een mycelium composiet kan ook met een andere type schimmel of substraat geproduceerd kan worden, om zo de eigenschappen van Ecovative te evenaren. Tabel 5 geeft een overzicht van de myceliumcomposiet materiaal eigenschappen per onderzoek. Door de grote verscheidenheid aan variabelen, zit er enig verschil in de resultaten, maar dit geeft ook meteen de diversiteit van het materiaal weer. Naast het bepalen van de materiaal eigenschappen op zich, is het interessant om het myceliumcomposiet te vergelijken met andere gebruikte bouw en/of isolatie materialen. Dit geeft een goed inzicht voor welke toepassingen dit composiet geschikt is. Zoals te zien in tabel 6, is het vergelijkbaar met EPS, maar dan helemaal opgebouwd uit natuurlijke grondstoffen.

Tabel 5 Overzicht mycelium composiet eigenschappen per onderzoek

	Ecovative [63]	Philip Ross [61]	TU Delft [54]*	TU/e [68]	Avans [69]
Dichtheid [kg/m ³]	122	318	82	215***	274
Druksterkte [MPa] 10%	0,1	0,5	-	0,1	0,1
Treksterkte [MPa]	-	0,2	0,1	-	-
Buigsterkte [MPa]	0,2	-	-	-	-
E- modulus [MPa]	1,1	1,3	-	-	-
Thermische geleidbaarheid [W/mK]	0,04	-	Goed **	-	-
Vochtopname 53,3% RL [%]	8	-	Matig	-	-
Composteerbaarheid (dagen)	30	-	-	-	-
Vlam verspreiding	20	-	Gemiddeld	-	-

* niet alles gemeten volgens industriële standaarden maar wel referentie materialen gebruikt ter vergelijking

** Vergelijkbaar met EPS en Kurk

*** gemiddelde

Tabel 6 Eigenschappen mycelium composiet in vergelijking met andere bouw en/of isolatie materialen

	Mycelium composiet [63]	Kurk [70]	EPS 100 [71]	Bio Foam [72]	Starch based foam [61]	Hempcrete [68]
Dichtheid [kg/m ³]	122	200	20	35	260	445
Druksterkte [MPa] 10% vervorming	0,12	1	0,1	0,2	1,09	0,4
Treksterkte [MPa]	-	0,85	0,15	-	-	-
Buigsterkte [MPa]	0,23	-	0,15	0,3	-	-
E- modulus [MPa]	1,14	20	6	-	183	-
Thermische geleidbaarheid [W/mK]	0,039	0,04	0,036	0,034	-	-
Vochtopname 53,3% RL [%]	8	-	4	-	-	-
Composteerbaarheid (dagen)	30	-	-	Industrieel	-	-
Vlamverspreiding	20	-	-	Eurobrand klasse E	-	-

In het project biobased composieten brug wordt biofoam als kernmateriaal gebruikt. Tabel 6 laat zien dat ook het mycelium in de toekomst een alternatief kernmateriaal zou kunnen zijn.



Op 21 januari 1986 ontploft de Space Shuttle Challenger in de lucht, 73 seconden nadat hij is gelanceerd. Bij de ontploffing komen alle zeven inzittenden om. Oorzaak was een O-ring, een gasdichte afsluiting, die niet bestand was tegen de lage temperatuur op het moment van lancering. Vrijwel meteen lekten er gassen en brandstof uit de Challenger, waardoor de shuttle vlam vatte en uit elkaar brak.

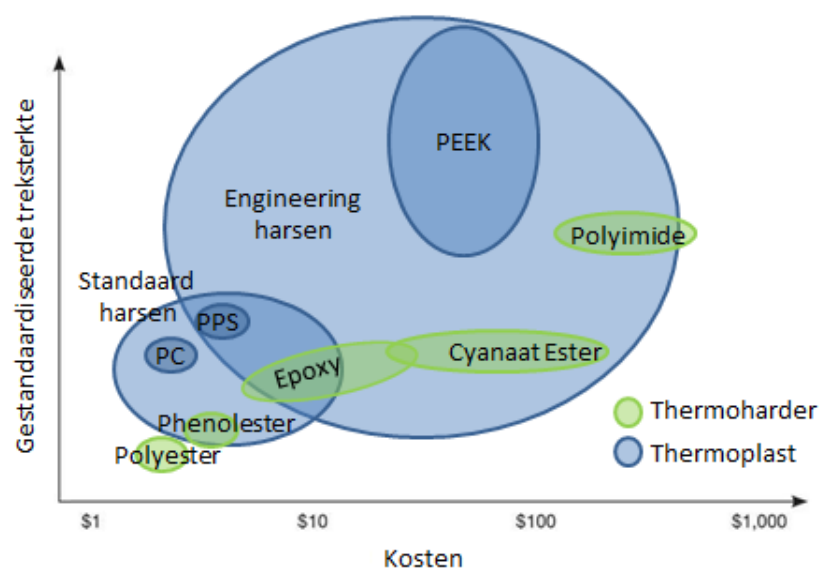
<http://www.isgeschiedenis.nl/toen/januari/>

Hoofdstuk 4

‘Bio’-polymeren

In composieten worden polymeren vaak alléén gezien als ‘dat materiaal wat de vezels bij elkaar houdt’. Het Challenger ongeluk was wellicht niet gebeurd als degene die voor de lancering verantwoordelijk was had geweten dat polymeren bij bepaalde temperaturen niet meer kunnen bewegen en dus ook niet meer hun functie kunnen vervullen, in dit geval afdichten. Daarom is het voor engineers onverwacht nuttig om te begrijpen waarom polymeren zo zijn als zij zijn.

Polymeren worden ingedeeld in verschillende groepen, afhankelijk van de toepassing. Een veel gebruikte groep is de groep van engineering polymeren. Daarin wordt nog onderscheiden in thermoharders en thermoplasten. Het verwerkingsproces verschilt dusdanig dat de keuze vaak om productietechnische redenen en vanuit de applicatie gemaakt wordt. Afbeelding 21 geeft de gestandaardiseerde treksterkten in relatie tot de kosten van thermohardende en thermoplastische polymeren in de composietindustrie.



Afbeelding 21 Gebruikelijke polymeren in de composiet industrie [73]

Thermoplastische polymeren hebben als meest karakteristieke eigenschap dat zij (her)smeltbaar zijn, in tegenstelling tot thermohardende polymeren die, eenmaal uitgehard, hard blijven en pas bij grote toegevoegde hitte tot as ontleden.

Tabel 7 Thermoplasten en thermoharders

Thermoplast 	Thermoharder 
Smeltbaar	Smelten niet meer maar ontleden bij hoge T
Polymeerketens in sommigen domeinen amorf (ongeordend)	Amorf
Polymeerketens in sommigen domeinen opgevouwen tot kristallijne fase (geordend)	Opvouwen door star netwerk niet mogelijk; 'glasachtig' netwerk
Smelttraject van amorfe fase met glasovergang T_g	T_g aanwezig maar niet zo uitgesproken als bij thermoplasten. Doorgaans de temperatuur waarbij de vernetting plaats vindt.
Kristallijne fase heeft een smeltpunt, amorfe fase een smelttraject	Smelt niet
Grote groepen verstevigen het polymeer en verhogen de T_g	Groten groepen voegen toe aan stijfheid
Lineaire keten die onder belasting langs elkaar glijden	Driedimensionale netwerken die ook onder belasting niet vervormen maar plotseling kunnen breken

In tegenstelling tot de biovezel is het biopolymeer, oftewel biohars, niet afwijkend van het standaard polymeer. De moleculaire samenstelling is precies hetzelfde, alleen hebben alle of een deel van de in het polymeer aanwezige koolstofatomen niet een fossiele, maar een bio-based oorsprong. Een epoxyhars met bio-based koolstoffen heeft dezelfde eigenschappen als de epoxyhars met koolstoffen van fossiele afkomst. Voor de ontwerper is het soms wel interessant te weten welke polymeren gebruikt kunnen worden als een ontwerp "bio" moet zijn. Veel polymeren kunnen worden geproduceerd van planten. Het kost alleen meer geld en energie omdat het proces wat door de natuur in een hele langenperiode 'gratis' gebeurt nu op industriële wijze plaats moet vinden. Tabel 8 geeft de beschikbaarheid weer van thermohardende en thermoplastische polymeren afkomstig uit biomassa versus de polymeren die nog steeds alleen uit de fossiele stroom verkrijgbaar zijn.

Tabel 8 Thermoharders en thermoplasten uit de fossiele en de biomassa stroom

Polymeren uit de fossiele stroom			Polymeren uit de biomassa stroom		
Afkorting	Thermoplast	Thermoharder	Afkorting	Thermoplast	Bouwstenen
PAI	Polyamideimide		FDCA		Furaandicarbonzuur
PEI	Polyetherimide		HMDA		Hexamethyleen diamine
PEK	Polyetherketon		MEG		Monomethyleenglycol
PEEK	Polyetheretherketon		MMA		Methylmethacrylaat
			TZ		Tereftaalzuur
PES	Polyethersulfon		ABS	Acrylonitril-butadien-styreen	
PI	Polyimide		PA	Polyamide	
POM	Polyacetaal		PBS	Polybuteensuccinaat	
PPA	Polyftalamide		PBT	Polybutenteerftalaat	
PPS	Polyphenyleen sulfide		PC	Polycarbonaat	
PPSU	Polyphenylsulfon		PE	Polyethyleen	
PSU	Polysulfon		PEF	Polyethyleenfuranaat	
SAN	Styreen acrylonitril		PET	Polyetheenteerftalaat	
AH		Alkydharsen	PHA	Polyhydroxyalkanaat	
DPA		Diallylftalaat	PLA	Polymelkzuur	
EH		Epoxieharsen		Epoxyharsen	
MF		Melamine formaldehyde	PMMA	Poly-methylemethacrylaat	
PET		Polyesterharsen	PP	Polypropyleen	
PF		Phenolformaldehyde	PTT	Polytrimethyleenteerftalaat	
UF		Ureumformaldehyde	PU	Polyurethaan (ook als thermoharder)	
			PVC	Polyvinylchloride	
			SBR	Styreen-butadien rubber	

4 - 1 Bio-componenten van polymeren

Afbeelding 22 laat in een breakdownschema de weg van plant naar polymeer zien [74], [4]. In het kader van dit boek is het nadrukkelijk niet de bedoeling om de verschillende chemische en productiemethoden van plant naar polymeer te beschrijven. In een breakdownschema zal tevens de weg aangeduid worden die nodig is om van biomassa bouwstenen te produceren waarmee polymeren geproduceerd kunnen worden. Het schema laat zien welke bouwstenen uit deze stromen gewonnen kunnen worden die vervolgens kunnen worden omgezet tot polymeren. In principe kunnen uit een plant naast natuurrubber en de vezel nog vier grondstofstromen geïdentificeerd worden [35]

- Plantenolie
- Cellulotische stroom
- Lignine stroom
- Zetmeel stroom

Om bijvoorbeeld de lignocellulotische stroom verder te verwerken moet de grondstof twee raffinage processen doorlopen. Het primaire proces, voorbehandelen en fractioneren scheidt de stroom in cellulose, lignine en hemicellulose. In het tweede proces wordt cellulose enzymatisch gehydrolyseerd, verder gefermenteerd en gesynthetiseerd tot eenvoudige alcoholen. Lignine wordt thermochemisch gedepolymeriseerd en geconverteerd tot zogenoemde platform chemicaliën (basisstoffen waaruit bulk chemicaliën worden gemaakt), zoals styrenen en fenolen. Deze processen zijn zeer kostenintensief en door de chemische behandelingen en energie consumerende processen is het nog maar de vraag hoe ‘groen’ de resulterende polymeren eigenlijk zijn.

4 - 1.1 Echt groene polymeren

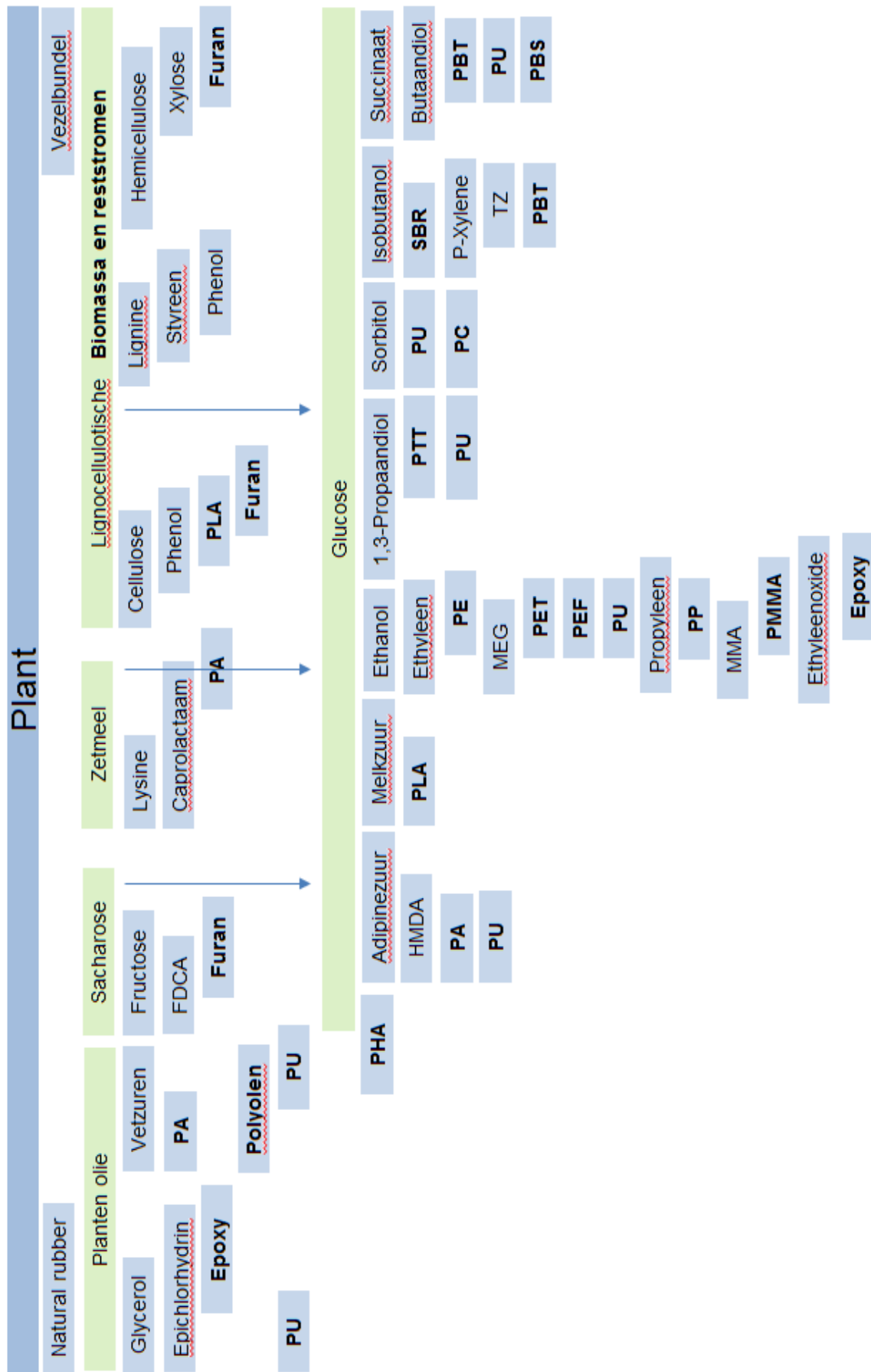
Dé bouwsteen voor alle polymeren is etheen wat voornamelijk uit het naftakraakproces gehaald wordt. Tegelijkertijd is er een hoge methaanuitstoot wat een sterke broeikas effect heeft. Methaan is een 25 keer sterker broeikasgas dan CO₂, waardoor in de state-of-art methaan omgezet wordt in CO₂ en daarbij energie gewonnen wordt volgens



In 1990 is het voor het eerst gelukt om methaan om te zetten in etheen [75] volgens



Echter – deze reactie verloopt bij 800-900°C en de energieopbrengst is laag. Als het lukt om dit proces efficiënter te laten verlopen bestaat een reële kans etheen uit methaan te produceren waardoor niet alleen de hoeveelheid broeikasgas verminderd wordt maar de bouwsteen voor alle polymeren uit volledig niet-fossiele grondstoffen gewonnen wordt.

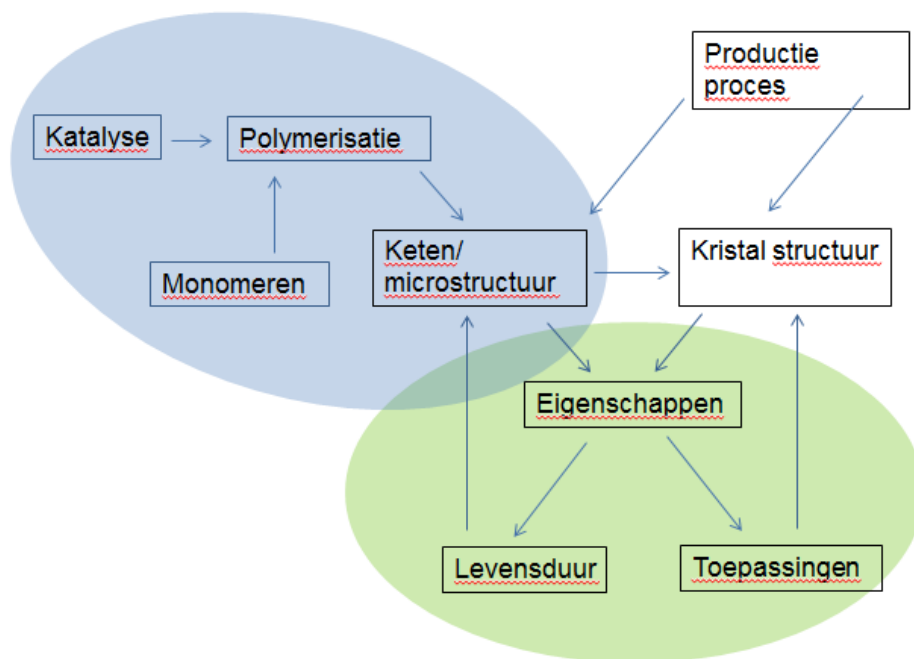


Afbeelding 22 Breakdownschema de weg van plant naar polymeer

4 - 2 Het grillige gedrag van polymeren

Wat is de taak van een polymeer in een composiet? Matrixpolymeren houden de vezels op hun plek en verdelen externe belastingen [12]. Maar – welke polymeren zijn toepasbaar in warme of koude omstandigheden en waarom? En wat heeft de glasovergangstemperatuur daarmee te maken? Waardoor worden sterkte en modulus bereikt en veranderd? Om een antwoord daarop te verkrijgen is het nodig om de structuur van een polymeer te kennen en te begrijpen dat de structuur onder verschillende omstandigheden op verschillende wijze kan veranderen. Simpel gezegd is alles een vraag van de beweeglijkheid van het polymeer.

In het kader van dit boek is het onmogelijk om diep in de polymeerkunde te duiken. Er bestaat naast veel andere boeken een uitstekend, laagdrempelig standaardwerk voor verdere studie, “Polymeren – van keten tot kunststof” van A.K. van der Vegt, Delft University Press (1991), voor wie meer van polymeren wil weten. In het vervolg wordt een poging ondernomen om kort te schetsen hoe een polymeer in elkaar zit en wat de belangrijke factoren en afhankelijkheden zijn tussen structuur van een polymeer en de mechanische eigenschappen.



Afbeelding 23 Schema afhankelijkheid mechanische eigenschappen en structuur van polymeren

Beweeglijkheid

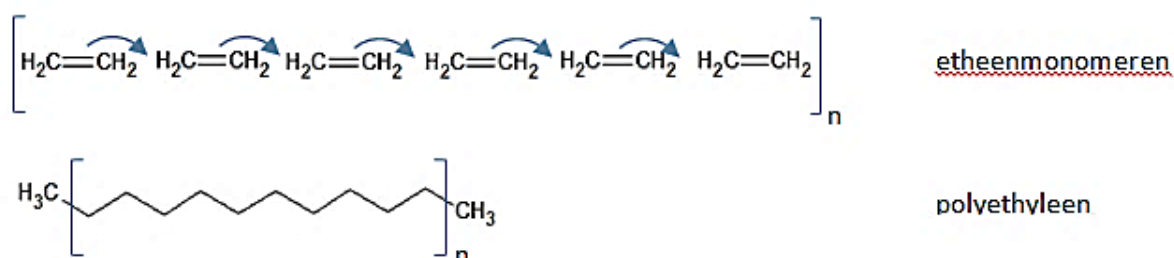
Hoe beter een polymeerketen kan bewegen hoe flexibeler hij is. De rek wordt daardoor bepaald. Over het algemeen wordt een polymeer met een zeer kleine rek als bros aanschouwd. Waardoor wordt de beweeglijkheid van het polymeer bepaald?

4 - 2.1 Opbouw polymeerketen

Polymeren bestaan uit monomeren die aan elkaar gekoppeld zijn. De structuur van het monomeer bepaalt de structuur en de eigenschappen van het polymeer. In het polymerisatie proces wordt bepaald welke monomeren tot polymeerketens aan elkaar worden verbonden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen:

- **Homopolymeer:** 

Hetzelfde monomeer (bijvoorbeeld alleen etheen; daaruit resulteert polyetheen)



Afbeelding 24 Radicaalreacties verbinden etheen monomeren tot polyethyleen ketens

Zo kunnen polymeerketens van enkel alkeeneenheden zoals etheen of propen alleen lange ketens vormen die:

- apolair zijn
- opvouwen tot kristallijne en amorse segmenten (zie paragraaf 4-2.2)
- lineair zijn, dus niet krullen (geen H-bruggen mogelijk)
- vertakkingen zoals door de methylgroepen van polypropyleen  of bij polymeren van hogere alkenen zijn de oorzaak voor een lagere kristalliniteit
 - langs elkaar heen kunnen bewegen, de thermoplasten
- een lage glasovergangstemperatuur (T_g) hebben (zie paragraaf (zie paragraaf 4-2.3))
- **Co-polymeer:** 

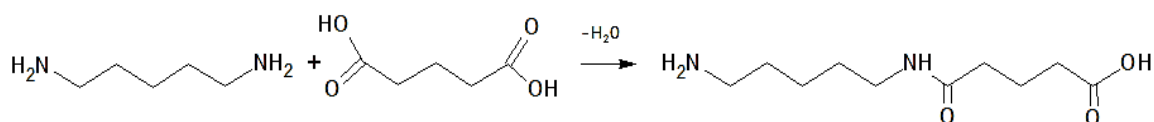
Verschillende monomeren (bijvoorbeeld etheen en propen; daaruit resulteert een copolymeer van polyethyleen en polypropyleen) op een random plaats

- **Block-co-polymeer:** 

Verschillende monomeren die eerst voor-gepolymeriseerd zijn tot korte ketens en aansluitend als ketenblokken met elkaar verder worden gepolymeriseerd.

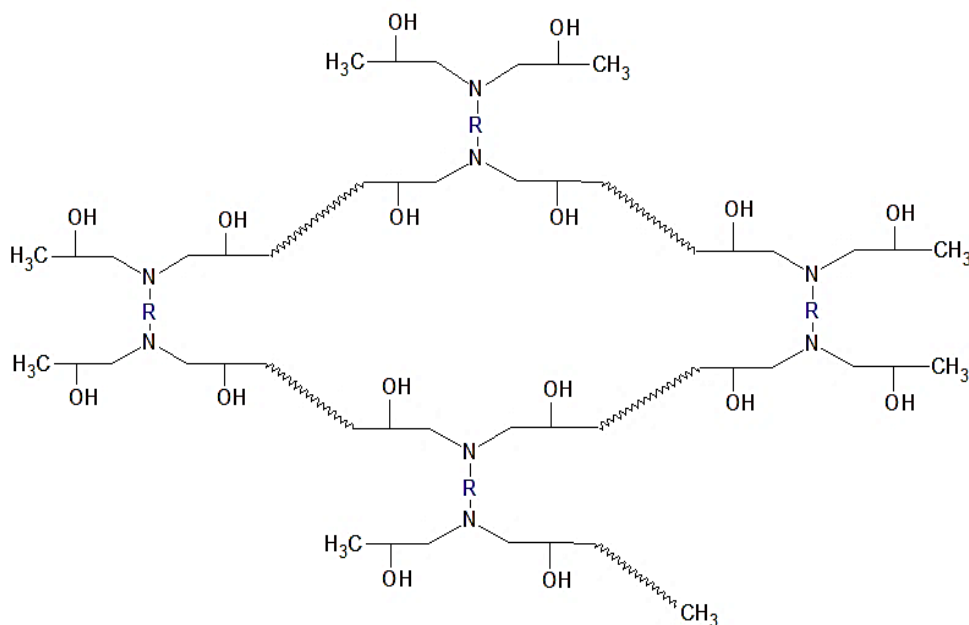
Naarmate de complexiteit van de monomeren verandert, verandert ook de morfologie van het polymeer; de kristallijne segmenten, de mogelijkheid om te draaien en de mogelijkheid om door middel van een chemische reactie tussen reactieve groepen in het monomeer ketens te vormen. Afbeelding 25 geeft het voorbeeld van een reactie tussen glutaarzuur (1,5-pentaandizuur) en hexamethyleendiamine. Er ontstaat een molecuul waarbij de functionele

groepen aan de uiteinden nog intact zijn. Verdere toevoer van glutaarzuur en diamine leidt tot verdere vernetting, maar alleen tot lineaire ketens. Het resulterende polymeer is een thermoplast omdat de ketens langs elkaar heen kunnen glijden. Door de verhoogde complexiteit van het polymeer t.o.v. polyethyleen zal het polymeer beter onder belasting functioneren en zal de glasovergangstemperatuur (T_g) ervan hoger liggen.



Afbeelding 25 Reactie tussen een dicarbonsuur en een diamine

De beweeglijkheid wordt nu bepaald door de vorm van de monomeren. Zijn de monomeren kort en lineair ontstaat een flexibel polymeer met vrije draaibaarheid. Zijn de monomeren lang en/of vertakt ontstaat een polymeer met veel vertakkingen en ruimte tussen de ketens. Daardoor wordt de draaibaarheid en beweeglijkheid langs elkaar heen gehinderd. Hebben de monomeren grote groepen zoals benzeenringen ontstaat een polymeer wat door de grote groepen gehinderd is in beweeglijkheid en draaibaarheid. Hebben de monomeren functionele groepen ontstaan vernettingen die tot een driedimensionaal netwerk leiden tot onbeweeglijke polymeerstructuren, de thermoharders [76].



Afbeelding 26 Deel van een epoxy netwerk

4 - 2.2 Kristalliniteit

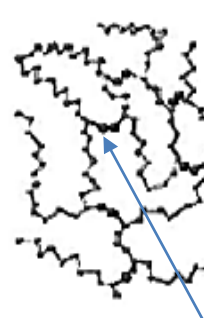
Polymeren met een grote bewegingsvrijheid kunnen makkelijk opvouwen en/of langs elkaar heen glijden. Het glijden resulteert in een grote flexibiliteit en daarmee grote rekbaarheid. Het opvouwen van ketens resulteert daarentegen in kristallijne domeinen die zeer sterk zijn maar minder goed presteren onder impact. Domeinen die niet opgevouwen maar ongeordend voorkomen hebben een amorf structuur. Homopolymeren vouwen makkelijker op dan co-polymeren omdat de strakke ordening door het verschil in moleculaire structuur van co-polymeren gestoord wordt. Het opvouwen van een lange keten levert grotere kristallijne domeinen op. In die zin draagt ook toenemend molecuulgewicht toe aan kristalliniteit.



Polymeerketen van 200 eenheden opgevouwen. Dichtheid is hoog.



Polymeerketen van 200 eenheden met zijtakken. Dichtheid is lager en polymeer is amorf.



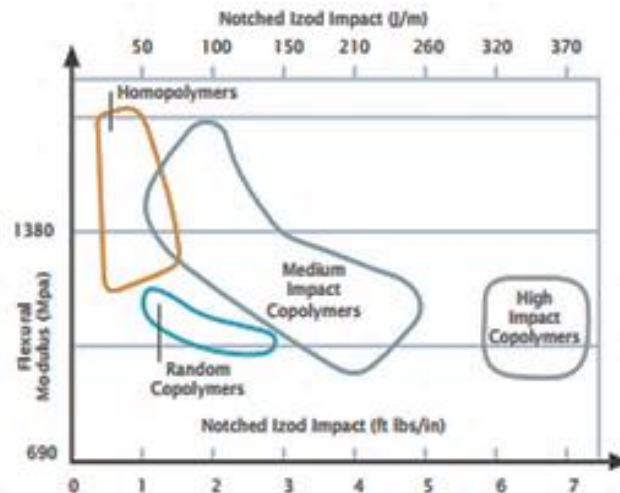
Polymeerketen van 200 eenheden met elkaar vernet (thermoset). Dichtheid is nog lager.

Afbeelding 27 Schematische weergave van een mooi opgevouwen polymeerketen (links), verstoord door zijtakken (midden) en een netwerk (rechts), naar [77]

Ketens zijn of amorf (ongeordend) of vouwen zich op tot kristallijne domeinen (geordend). Om een idee te geven kunnen strak opgevouwen polymeerketens (kristallijn) vergeleken worden met een UD vezelmat in composieten. Een polymeerketen netwerk is dan te vergelijken met een vezelmat. Hoe meer kristallijn een polymeer is hoe sterker het is. Maar de grote kristalliniteit zorgt tevens voor een hogere brosheid. Hierbij is te vermelden dat dichtheid, die doorgaans op technische databladen vermeld wordt, een synoniem is voor kristalliniteit. Kristalliniteit wordt gecorreleerd aan dichtheid omdat opgevouwen ketens de meest dichte pakking geven. Er is dan weinig vrij volume tussen de ketens. Het vergelijken van technische data kan uitsluitsel geven welk materiaal kristallijner is en daardoor minder of meer geschikt is voor de gewenste toepassing. Zo wordt bijvoorbeeld de beste weerstand tegen impact gepresteerd door 'high impact co-polymers', afbeelding 28, die op basis van de lengte van de mee-gepolymeriseerde zijtakken een dusdanig verstoord ketenstructuur hebben gekregen dat zij niet meer overal tot kristallijne domeinen kunnen opvouwen en daardoor minder bros worden [78].

Een polymeer dat wordt bloot gesteld aan hoge drukken wordt bros. Dit is te verklaren door het verhogen van de dichtheid door het samenpersen als gevolg van hoge druk.

Verhogen van dichtheid betekent verhogen van kristalliniteit en daarmee verhogen van brosheid.



Afbeelding 28 Indeling polymeren naar structuur en impact prestatie

4 - 2.3 Glasovergangstemperatuur

De glasovergangstemperatuur (T_g), is de temperatuur waarbij een hars overgaat van de 'glasachtige' toestand (stijf en bros, d.w.z. weinig plastische vervorming bij breuk) naar de 'rubberachtige' toestand (slap en taai). Met betrekking tot de beweeglijkheid is te stellen dat een polymeer bij zijn glasovergangstemperatuur bevroest en niet meer kan bewegen. Een polymeer waarbij de beweeglijkheid door de moleculaire structuur al beperkter is zal dus eerder bij zijn vriespunt komen dan een polymeer met hoge beweeglijkheid. Met andere woorden: De T_g van een goed beweeglijk polymeer zal op een lagere temperatuur zijn dan de T_g van een minder goed beweeglijk polymeer. Polyethyleen bijvoorbeeld heeft een T_g van -110°C , terwijl de methylgroep van polypropyleen de beweeglijkheid zo verstoort dat de T_g bij -5°C ligt. Alles wat de beweeglijkheid beperkt leidt tot verhoging van de T_g . De glasovergang vindt alleen plaats in amorf domeinen en hangt af van:

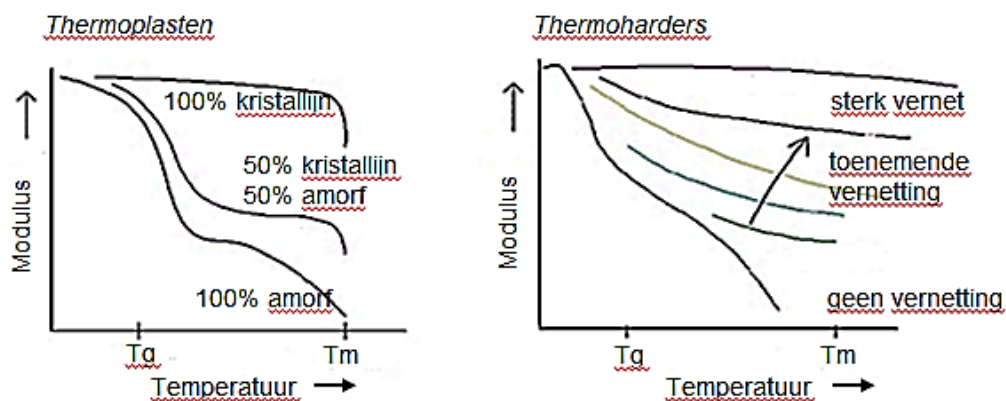
- Grootte van aanwezigheid van zijtakken in keten
- Vernetting leidt tot 'starre' ketens en hoger T_g
- Tacticiteit (regelmaat) van de keten, hoe regelmatig de opbouw hoe lager de T_g
- Snelheid afkoelen in productie. Langzaam afkoelen verhoogd de kristalliniteit en verlaagd de glasovergang. Amorfe delen hebben een hogere glasovergangstemperatuur.
- Weekmakers: kleine moleculen verhogen de vrije ruimte tussen de ketens. Van der Waals krachten worden lager en de beweeglijkheid bij lage temperaturen wordt daardoor verhoogd. De glasovergang vindt plaats bij lagere temperatuur

- Hoger molecuulgewicht leidt tot minder vrije ruimte en daarmee tot verhoogd glasovergangstemperatuur

Gebruik van een composiet in de buurt van of boven deze temperatuur wordt afgeraden. Het effect van overschrijden van de glasovergangstemperatuur is bij thermoplasten vele malen sterker dan bij thermoharders, maar wordt bij beide door het versterkingsmateriaal gereduceerd. De glasovergangstemperatuur hangt af van de omstandigheden tijdens het uitharden (bij thermoharders). Een hogere glasovergangstemperatuur kan bereikt worden door de uitharding bij een hogere temperatuur en bij een langere periode van verwarming te laten plaatsvinden [12].

4 - 2.4 Sterkte en E-Modulus

De ketenlengte bepaald het molecuulgewicht van een polymeer. Over het algemeen geldt dat hoe hoger het molecuulgewicht hoe sterker en stijver het polymeer is. Vertakkingen leiden tot afname van dichtheid (maar niet tot afname van het molecuulgewicht) en daardoor tot afname van sterkte en stijfheid (wordt ook wel E-modulus genoemd). Vernetting van een polymeer resulteert in een zeer hoog molecuulgewicht wat zich vertaalt in toenemende sterkte en stijfheid.



Afbeelding 29 Modulus in afhankelijkheid van kristalliniteit en vernettingsgraad bij toenemende temperatuur, vrij naar [79]

Afbeelding 29 geeft de E-modulus in relatie tot kristalliniteit en vernettingsgraad bij oplopende temperatuur weer. In de grafiek wordt duidelijk dat de mechanische eigenschappen van thermoharders (rechter grafiek) in veel mindere mate afhankelijk van de temperatuur zijn dan bij thermoplasten (linker grafiek), die bij temperaturen tussen glastransitie en smeltpunt sterk aan eigenschappen verliezen.

4 - 2.5 Dwarsverbanden en 'ontwerp' van eigenschappen

Matrixpolymeren hebben de functie om vezels aan elkaar te bevestigen, knikken van de vezels te voorkomen, om de belasting van vezel tot vezel over te dragen en om de vezels te beschermen. De mate waarin dit gebeurt is gerelateerd aan de eigenschappen van het polymeer, zoals sterkte, modulus en T_g . Sterkte en modulus zijn te vinden op de technische data sheet van het polymeer. Bij het zoeken naar een geschikt polymeer zal men rekening moeten houden met de dichtheid (kristalliniteit), het molecuulgewicht (melt flow index) en ook met de morfologisch toestand van het polymeer om voor de toepassing belangrijke eigenschappen te kunnen instellen. Echter, deze eigenschappen zijn direct afhankelijk van de morfologie van het polymeer. Tabel 9 vat de samenhang samen tussen de meest belangrijke eigenschappen en de morfologie van een polymeer, welk niet op de datasheets vermeld staat maar af te leiden uit bijv. de melt flow Index en de dichtheid. Een kwantitatieve uitspraak is hier niet mogelijk omdat dit afhangt van de verschillende structuren van de polymeerketen. Concluderend uit het voorafgaande kan het volgende overzicht opgesteld worden:

Tabel 9 Correlatie morfologie en mechanische eigenschappen van polymeren [80]

Met toenemend	Polymerisatie-sequentie	Molecuulgewicht Mw	Kristalliniteit	Keten vertakking	Keten Vernetting Thermoharder
Afhankelijk van	A Homo-polymeer vs co-polymeer	B	C Keten-vertakking, druk, koelsnelheid	D Monomeren	E Hardener
MFI (Meltflow index)		Lager		Lager	
ESCR (stress cracking resistance)	Laag	Beter	Slechter	Beter	Beter
Slagvastheid	Laag	Hoger	Lager	Hoger	Hoger
Sterkte	Hoog	Hoger	Hoger	Lager	Hoger
Dichtheid		Hoger		Lager	Lager, amorf
Modulus	Hoog	Hoger	Hoger	Lager	Hoger
Kruip weerstand	Hoog	Hoger	Hoger	Hoger	Hoger
Eigenschappen bij lage T (Izod of impact)	Bros	Slechter	Slechter	Beter	Slechter
Eigenschappen bij hoge temperaturen	Afhankelijk van T_m en T_g	Beter	Beter	Slechter	Beter
Permeabiliteit	Laag	Lager	Lager	Hoger	Hoger
T_g		Hoger	Hoger	Lager	Hoger
Krimp	Hoog		Hoger	Minder	Minder

Het vloeigedrag van polymeren wordt op twee verschillende manieren aangegeven. In het geval van thermoplasten spreekt men doorgaans over de meltflow index. Voor thermohardende resins gebruikt men viscositeit, oftewel te weerstand tegen vloeien. Men moet weten dat deze twee grootheden reciprook zijn aan elkaar. Met andere woorden: Hoe hoger het molecuulegewicht hoe hoger de viscositeit en hoe lager de melt flow index. De melt flow index wordt experimenteel bepaald door te meten hoeveel gram van een bepaald thermoplast binnen 10 min bij een constante temperatuur door een buis stroomt met gegeven lengte en diameter.

Zo kan een lage meltflow index verklaard worden uit een hoog molecuulgewicht (grote moleculen bewegen moeilijker langs elkaar heen).

Met toenemend	A	B	C	D	E
MFI (Meltflow index)		Lager		Lager	

Met toenemende vertakking wordt de dichtheid lager en neemt de meltflow toe. Stress cracking heeft te maken met het overschrijden van cohesieve krachten in een polymeer. Zoals bekend nemen de Van der Waals krachten toe met toenemend molecuulgewicht.

Met toenemend	A	B	C	D	E
ESCR	Laag	Beter	Slechter	Beter	Beter

Hoe hoger de vanderWaalskrachten hoe beter resistent tegen stress cracking. Een hoge dichtheid duidt op brosheid door het hoge gehalte aan kristalliniteit. Ketenvertakking zorgt hier voor lagere dichtheid en vernetting voor een hoog molecuulgewicht met een lage dichtheid. Een polymeer van hoog molecuulgewicht en lage dichtheid is het best beschermd tegen stress cracking. Een hoger molecuulgewicht leidt in het algemeen tot grotere slagvastheid (taaiheid), omdat er meer energie in het losmaken van de verbindingen gaat zitten bij breuk.

Met toenemend	A	B	C	D	E
Slagvastheid	Laag	Hoger	Lager	Hoger	Hoger

De sterkte en de stijfheid van een polymeer worden verhoogd door een hoge cohesie tussen de ketens, en door een hoog molecuulgewicht. Verhoogde kristalliniteit versterkt het polymeer omdat de ketens dan gericht zijn. Ketenvertakking daarentegen verlaagt de kristalliniteit en daarmee de sterkte. Door vernetting wordt het netwerk versterkt.

Met toenemend	A	B	C	D	E
Sterkte & stijfheid	Hoog	Hoger	Hoger	Lager	Hoger

De polymeereigenschappen bij lage temperaturen worden bepaald door de beweeglijkheid van het polymeer. Hoe amorpher een polymeer hoe bewegelijker, hoe lager de T_g en dus hoe beter de eigenschappen bij lage temperaturen.

Met toenemend	A	B	C	D	E
lage T	Bros	Slechter	Slechter	Beter	Slechter

Een random co-polymeer bijvoorbeeld heeft nauwelijks kristallijne domeinen. Hoger molecuulgewicht zorgt voor meer orde en dus minder beweeglijkheid en daarmee voor een verhoging van de T_g ; is dus slecht voor de eigenschappen bij lage temperaturen. Ketenvertakking daarentegen verlaagt de kristalliniteit en verhoogt daarmee het amorphe gehalte. Een polymeernetwerk is al vrij onbeweeglijk en daarom niet zo gunstig voor gebruik bij lage temperaturen.

Met toenemend	A	B	C	D	E
Permeabiliteit	Laag	Lager	Lager	Hoger	Hoger

Weerstand tegen permeanten is belangrijk voor toepassingen in een bepaald milieu, zoals water, chemicaliën of gassen. Permeabiliteit is een gecompliceerd fenomeen en hangt van veel meer parameters af dan alleen gewicht en kristalliniteit. In deze context verhoogt minder kristalliniteit de permeabiliteit doordat tussen de ketens veel vrije ruimte is waardoorheen een permeant kan bewegen. Tot slot is het nog interessant te vermelden dat polymeren door hoge kristalliniteit geneigd zijn te krimpen, simpel omdat zij in het afkoelingsproces op moleculair niveau opvouwen.

Met toenemend	A	B	C	D	E
Krimp	Hoog		Hoger	Minder	Minder

Samenvattend kan gezegd worden dat alle mechanische eigenschappen een gevolg zijn van de ketenlengte en de ketenvertakkingen.

4 - 2.6 Beschikbare bio-polymeren

De keuze voor een biopolymeer is niet makkelijk. Door de hogeschool Avans is in 2014 een marktstudie gedaan, tabel 10 [81].

Tabel 10 Overzicht Bioharsen 2014

Naam	Leverancier	Waar	Wat	% bio
Greenpoxy	Sicomini/MCtechnics	NLD	Epoxy	56
Super sap	Entropy resins/Scabro	USA/NLD	Epoxy	17
Biorez	TransFurans Chemicals	BEL	Furan harsen	70-100
EcoTek	AOC	USA	Isoftaalzuur ester	
EnviroGuard	CCP Composites	USA/FRA	Polyester	22
Dragonkraft	Dragonkraft	GBR	Epoxy	100
Envirez	Ashland	USA/ESP	Onverzadigde polyester	12
PTP	Bio-Composites and More	DEU	Epoxy	70
Biothan	Silitech Vertrieb	CHN	PU, aliphatisch	100
Bioresin	Cambridge Biopolymers	GBR	Epoxy van plantenolie	
EnviroLite®	Reichhold	USA/NLD	Sojaolie gebaseerd	25
Lait-X	JVS-Polymers	FIN	Polymelkzuur	
ExaPhen	Composite technical ser.	USA	Epoxy	95 ?
CreyFour™	Crey Bioresins	USA	Sojaolie gebaseerd	
Denacol GSR-	Nagase Chemtex	CHN	Epoxy	
CHS-Epoxy	Spolchemie	HUN	Epoxy	
GE30	Emerald materials	USA/NLD	Epoxy	

Van de biopolymeren van het bovenstaande overzicht blijken één jaar na publicatie al 50% van de biopolymeren niet meer commercieel verkrijgbaar te zijn. Uit de overblijvende beschikbare producten wordt gekozen op basis van beschikbaarheid in Europa. Verdere criteria zijn vacuuminjecteerbaarheid (o.a. verloop van viscositeit) en percentage biogehalte. Vier verschillende systemen worden nader onderzocht. Een polyester wordt vergeleken met twee epoxys, een transfuraan en een polyurethaan. In het vervolg wordt de chemie en de verwerkbaarheid als composiet van deze systemen toegelicht. Een screening op de vloeieigenschappen en een eerste test op treksterkte moet op een systeem wijzen wat aansluitend nader onderzocht zal worden.

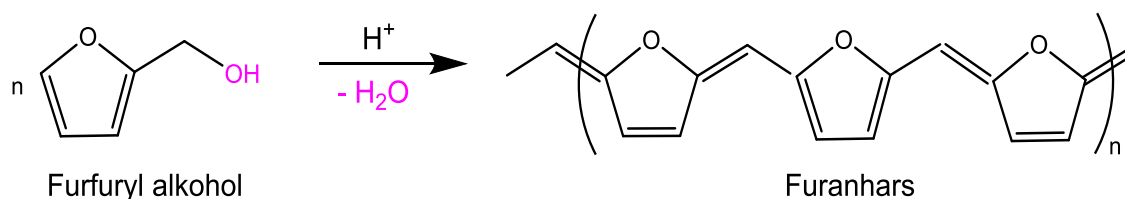
Tabel 11 Gekozen bioharsen van de beschikbare Europese kandidaten

Type	Naam	Harder
Polyester	Enviroguard Norsodyne 13390A (I93271A)	NOROX MEKP 925H
Epoxy	Supersap CLR	CLX
	Greenpoxy 56	SD4771
Transfuran	Furolite 050915A RF 2ST	S-type katalysator
Polyurethaan	Biothan 2MD1760 N/L	Biodur M330 LV

4 - 3 Chemie en verwerkbaarheid van de harsen

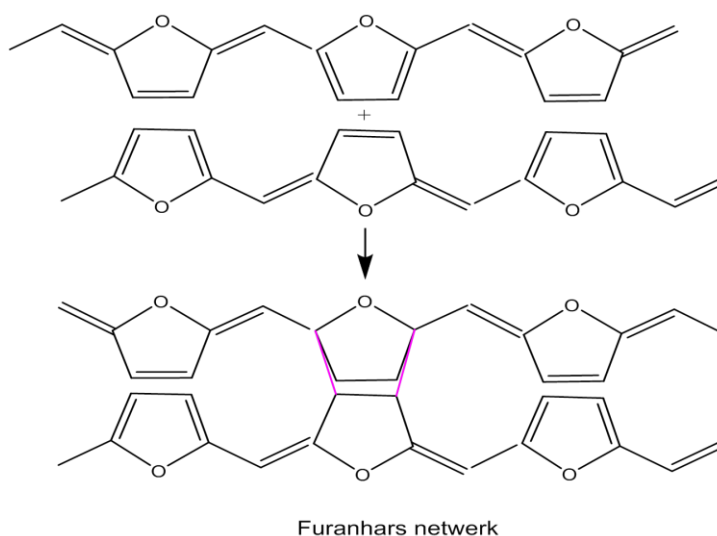
4 - 3.1 Furaanhars

Furaanharsen zijn op dit moment de enige harsen met 100% biogehalte. De componenten bestaan uit suikers. Het polymeer, lineair en vertakt, ontstaat in een exotherme zelfcondensatie polymerisatie van furfuryl alcohol tot furaanhars in aanwezigheid van een zure katalysator zoals p-tolueensulfoon-zuur.



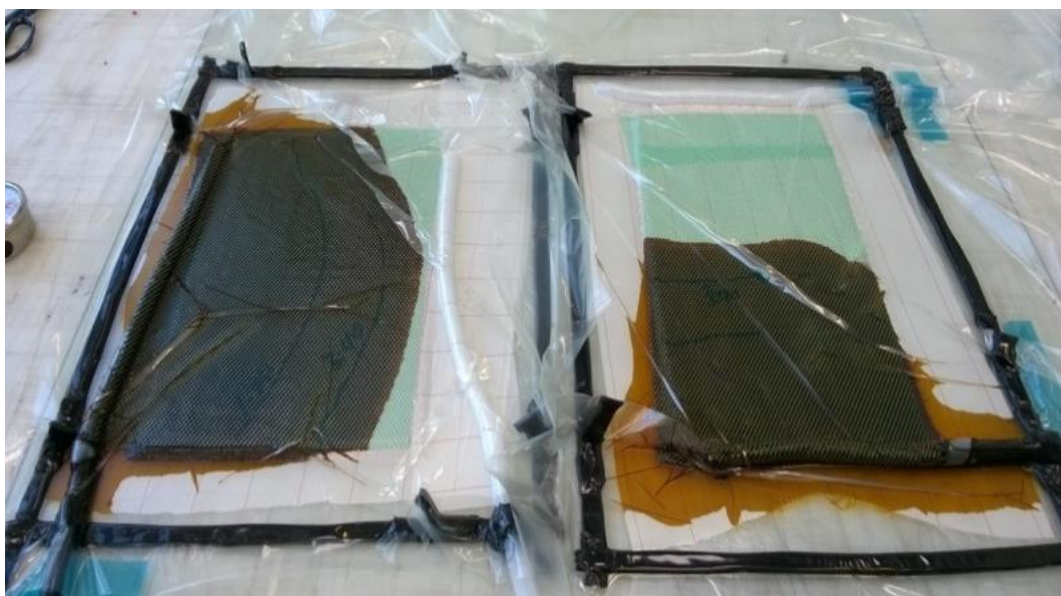
Afbeelding 30 Zelfcondensatie polymerisatie furfuryl alcohol tot furaanhars

De hitte uit de exotherme reactie kan oplopen tot het vlampunt van de hars. Bij de condensatiepolymerisatie komt water vrij [82], dat met het hars mengbaar is. Het hars wordt standaard geleverd in een verdunning met ca 5-10% watergehalte. Is het hars te dik om geïnjecteerd te worden kan water toegevoegd worden. Dit voordeel is ook meteen een nadeel omdat het kookpunt van water onder vacuüm makkelijk bereikt wordt, wat de hars minder geschikt maakt voor processen als vacuüminfusie. De waterdamp wil ontsnappen maar is gevangen wat resulteert in luchtbelletjes in het polymeer waardoor het expandeert. In een navernettingsreactie door temperatuur kan het water uit het polymeer getrokken worden. Door dit proces wordt de T_g van het product verhoogd wat een indicatie is dat het water als weekmaker uit het polymeer vertrokken is.



Afbeelding 31 Polymerisatie van furaanhars tot furaannetwerk

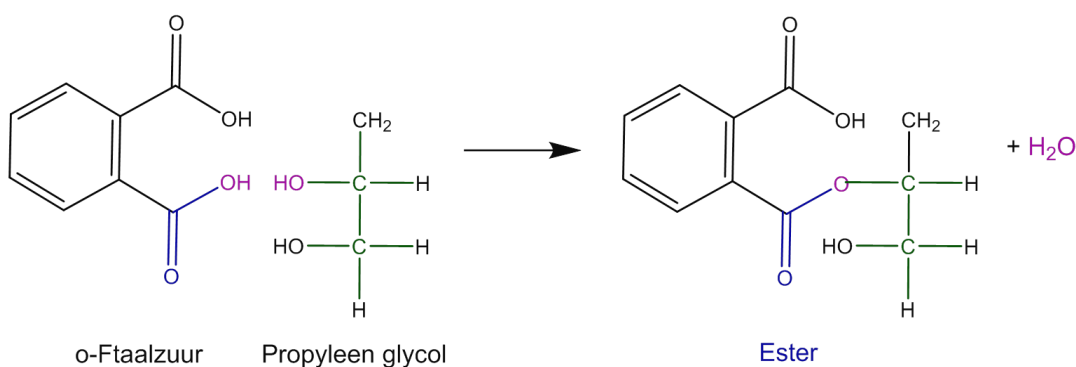
Een bijkomend nadeel is dat het drogen van het product krimp veroorzaakt waardoor het product vormstabiliteit verliest. Voor de vormstabiliteit zou het water voorafgaande aan het injectieproces uit het polymeer gehaald kunnen worden maar de viscositeit van het polymeer wordt in dat geval zo hoog dat het niet meer te injecteren is. Meestal worden furaanharsen dan ook niet geïnjecteerd maar met de hand gelamineerd of geperst. Deze producten zijn excellent bestand tegen chemische invloeden en vuur [83].



Afbeelding 32 Injectie van furaanhars, Inholland Composites

4 - 3.2 Polyester chemie

Polyesters ontstaan uit een condensatiereactie tussen diolen en onverzadigde diprotische zuren, zoals o-ftaalzuur. Een diol, een molecuul met meer dan één OH-groep, is nodig om de reactie aan beiden kanten van het molecuul te laten verlopen en tot polymeerketen te laten groeien. Ook bij deze reactie komt water vrij.



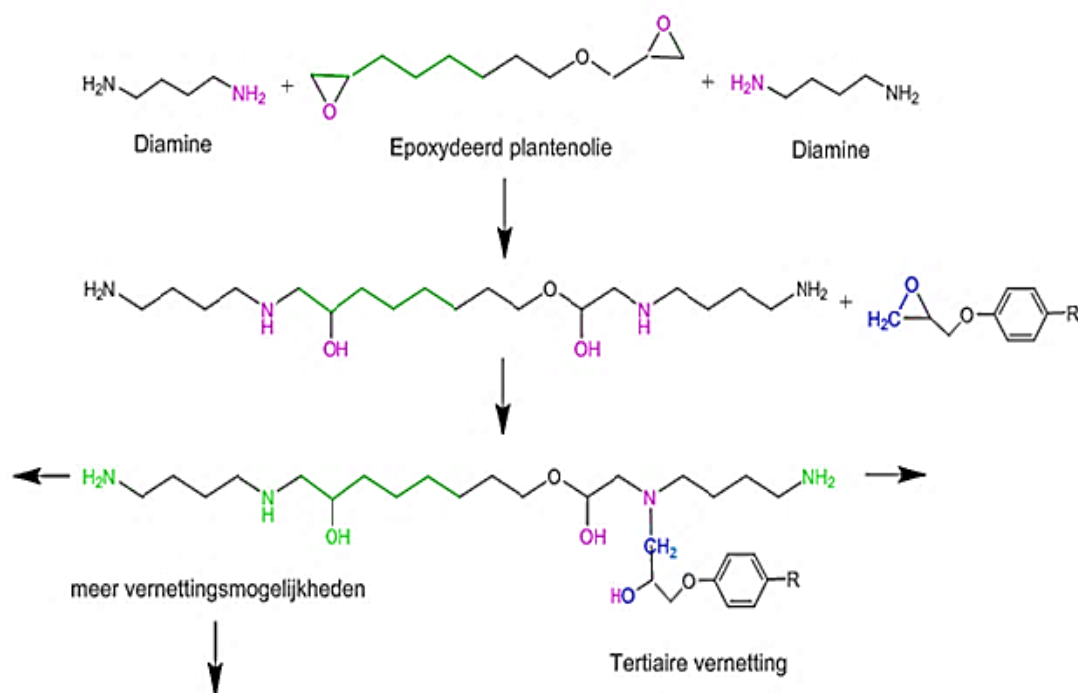
Afbeelding 33 Condensatiereactie tot polyesters

De reactie uit afbeelding 33 is een voorbeeld; elk verschil in grootte, type en proportie van reactanden leidt tot theoretisch oneindige hoeveelheid producten met verschillende eigenschappen, bijvoorbeeld iso-ftaalzuur voor betere chemische bestendigheid, Adipinezuur (alifatisch) voor meer flexibiliteit en aromatische (in veel gevallen gehalogeneerde) ringen voor betere vuurbestendigheid.

In het geval van Enviroguard Norsodyne 13390A (I93271A) van CCP composites [84] wordt het polymeer voor testhoeveelheden uit fossiele bronnen geproduceerd en bij aanvraag van zeer grote hoeveelheden (>7000 kg) wordt propyleen glycol uit hernieuwbare bronnen voor de reactie gebruikt. Het resulterende polymeer is moleculair gezien precies hetzelfde maar bestaat voor ca 20% uit groene koolstofatomen. Het verwerken van deze polyester gaat heel eenvoudig; het polymeer is geschikt voor vacuuminjectie.

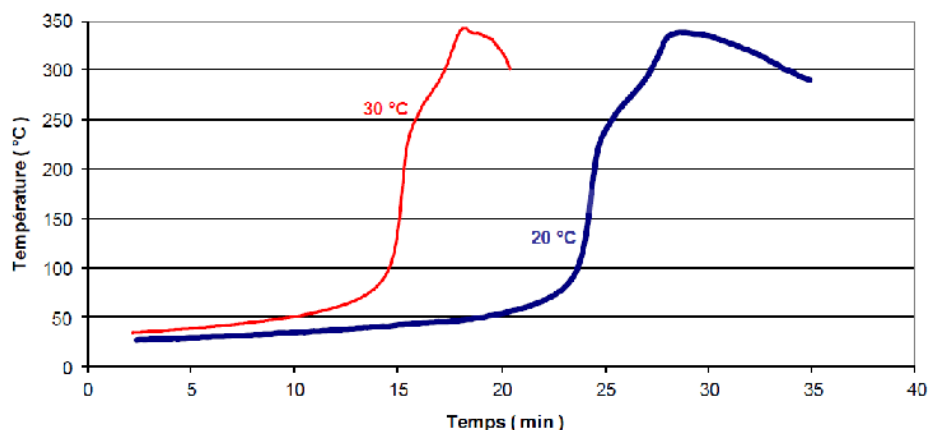
4 - 3.3 Epoxychemie

Epoxy op basis van hernieuwbare bronnen bevat in het geval van Greenpoxy 56 56% groene koolstofatomen welke conform opgaaf van producent Sicomin afkomstig is van reststromen vanuit de biodieselindustrie. De toegevoegde harder verlaagt het biobased percentage naar 44%. In de polymerisatiereactie wordt de epoxyring door aanwezige amine groepen geopend en worden de ketens met elkaar verbonden tot een driedimensionaal netwerk.



Afbeelding 34 Polymerisatie tot epoxynetwerken

Greenpoxy 56 wordt aanbevolen samen met een 'snelle' harder. Deze combinatie is een snel reagerend systeem waarbij veel hitte vrij komt. De exotherme piek kan tot 340°C [85] bereiken.

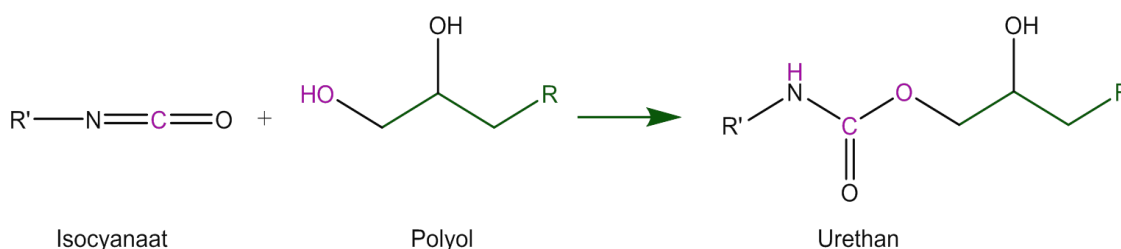


Afbeelding 35 Exotherme piek tijdens polymerisatie van epoxy

Tijdens het verwerken wordt duidelijk dat grote hoeveelheden harsmengsel in de pot, maar ook in een laminaat > 5mm voor een zichzelf versterkende exotherme reactie zorgen. De hitte kan niet voldoende afgevoerd worden en de temperaturen stijgen tot hoge waarden. Het harsmengsel in het injectievat kan daardoor spontaan ontvlammen en pluggen van schuim kunnen smelten onder te dikke laminaten. Om deze extreme reacties te voorkomen is een langzamere harder aan te bevelen. De temperatuurstijging is beter controleerbaar maar nog steeds is de warmteafvoer in dikke laminaten moeilijk. Dit systeem is zeer geschikt voor vacuuminjectie.

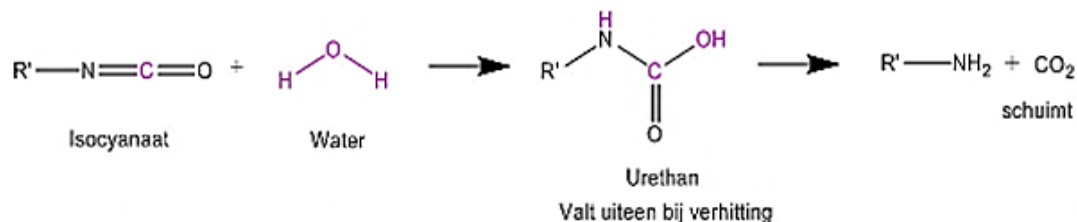
4 - 3.4 Polyurethaan chemie

Een interessant systeem is het polyurethaan Biothan 2MD1760. De reactie verloopt tussen de OH-groepen van een polyol, gebaseerd op 100% hernieuwbare stoffen, en een overschot (110%) van een organisch di-isocyaanaat.



Afbeelding 36 Polymerisatie van polyolen met isocyaanaat tot polyurethanen

Isocyaanaat is een hoog reactief molecuul en reageert spontaan met water, bijvoorbeeld in de hars, in de vezelmat, of in de slangen. Alle materialen moeten voor gebruik goed gedroogd worden om de ongewenste reactie met water te voorkomen. Is er nog water aanwezig, dan resulteert dit in schuim.

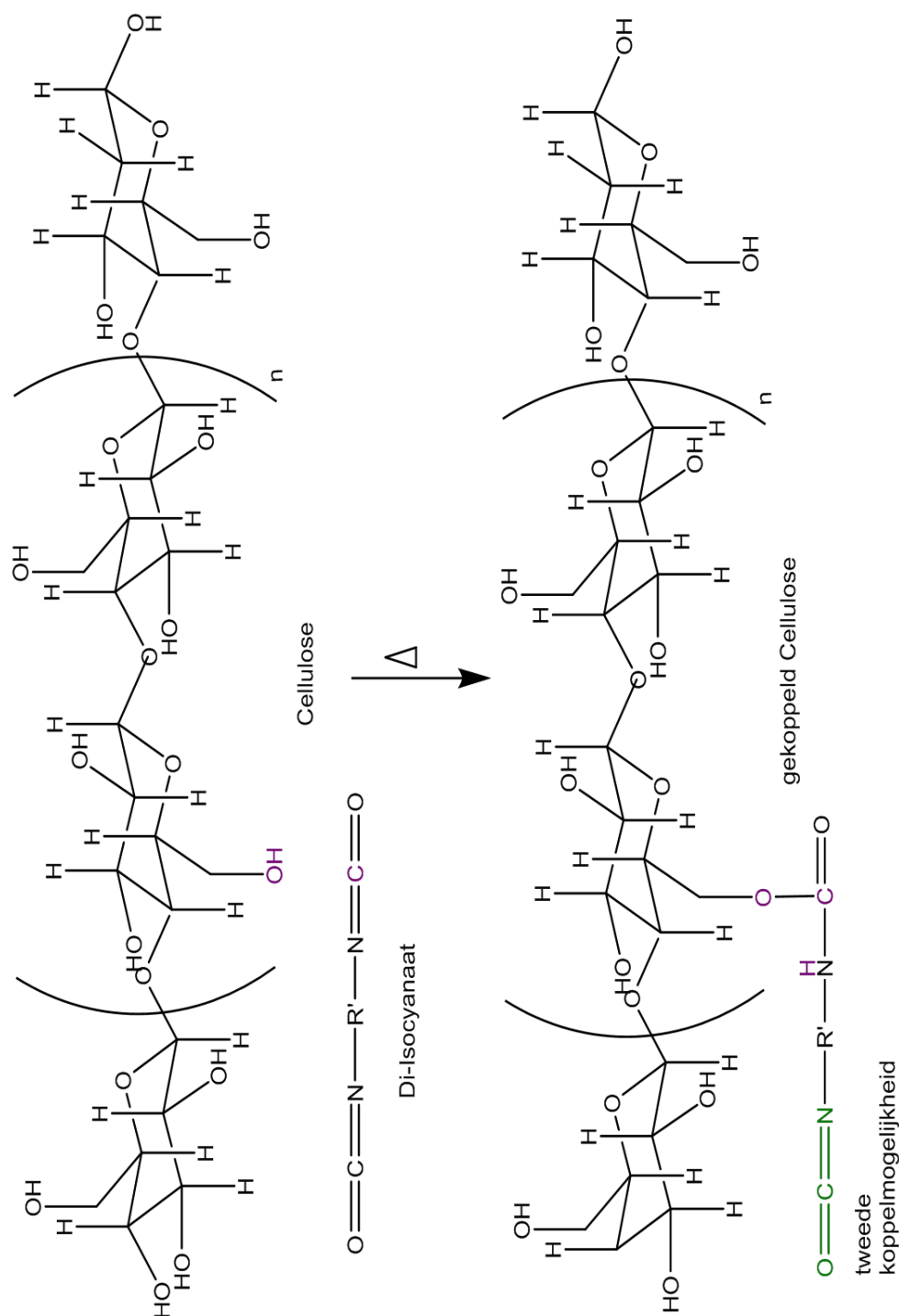


Afbeelding 37 Reactie van isocyaanaat met water, aanwezig in vezelmatten, injectieslangen, enz

De snelheid van het injectieproces is afhankelijk van de toegevoegde hoeveelheid harder [86]. Ook deze reactie verloopt exotherm en bij een te langzame reactie bereikt ook dit het mengsel in het reactievat het vlampunt. Het resulterende polymeer is een glashelder, glashard polymeer met uitstekende eigenschappen [87]. Echter – in een combinatie met een vezelmat van cellulose worden de sterkte en stijfheid niet bereikt en ziet er uit als in afbeelding 38. Een verklaring daarvoor ligt in het feit dat isocyaanaat met alle soorten OH-groepen reageert en dus ook met die van cellulose. Het waarschijnlijke mechanisme is vereenvoudigd beschreven in afbeelding 39:



Afbeelding 38 Resultaat (onverwacht) van een reactie met Biothan en vlasmat. De cellulosecomponent in het vlas heeft gereageerd met de isocyaanaat harder



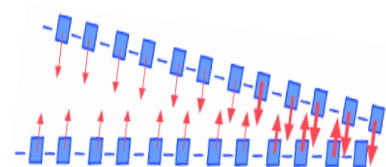
Afbeelding 39 Reactie van isocyaanaat met cellulose

4 - 4 Levensduur van polymeren

De levensduur van polymeren wordt bepaald door de mate van degradatie. Degradatie van polymeren resulteert uit veroudering door verschillende factoren. Polymeren kennen verschillende verouderingsmechanismen, geïnitieerd door tijd, thermisch (door temperatuur), hydrolytisch (door intrede van en reactie met water) of oxidatief (door UV straling of oxiderende chemicaliën). Tijd is een factor waardoor de polymeerketens dichter op elkaar komen te liggen. Daardoor verandert ook de morfologie van het polymeer want de dichtheid wordt verhoogd en dus ook de kristalliniteit. Dit fenomeen wordt 2^{de} kristallisatie genoemd. Het polymeer wordt sterker; de toenemende kristallisatie gaat helaas ook gepaard met een toename van brosheid.

Matrixpolymeren van composieten worden vaak blootgesteld aan vochtige weersomstandigheden en UV straling. Zoals in hoofdstuk 2-3 beschreven verminderen door opzwellen en resulterende scheuren de mechanische eigenschappen van het composiet [41]. De hydrofiele natuurvezel kan door het matrixpolymeer tegen wateropname worden beschermd mits het polymeer zelf geen water opneemt en doorgeeft.

Om te begrijpen waarom wateropname zo schadelijk is voor de eigenschappen van polymeren moet men weten dat zeker in het geval van onverniet ketens de stijfheid van het polymeer gerelateerd is aan de cohesiekrachten tussen de ketens, door de vanderwaalskrachten [88], [89]. Stoffen zoals water kruipen tussen de ketens en verlagen de T_g door deze binding te verbreken. Het polymeer wordt zachter; m.a.w. de modulus wordt lager.

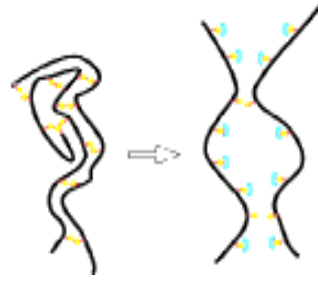


Afbeelding 40:
Verminderen van cohesiekrachten

Processen die op de een of andere manier de ketenlengte veranderen, zij het door radicaalreacties of door afbreekmechanismen, zijn verantwoordelijk voor de levensduur van het polymeer en daarmee voor de duur van gebruik. In het vervolg wordt het wateropnamemechanisme van polymeren en de impact van UV straling op de eigenschappen van polymeren toegelicht.

4 - 4.1 Waterabsorptie van polymeren

In een composiet kan ook het polymeer water opnemen volgens het diffusiemechanisme [90] door de matrix, versneld door imperfecties in de matrix zoals scheuren en poriën en capillaire werking langs de vezel-matrix interface, waarbij de snelheid en hoeveelheid van de opname afhangt van de polariteit, kristalliniteit, resterende harder moleculen of andere water aantrekkende toevoegingen, temperatuur en tijd.



Afbeelding 41 Vergroten van de afstand tussen de ketens door ingetreden water

Om het behoud van eigenschappen van een product te kunnen inschatten is de diffusie coëfficiënt van een bepaalde vloeistof door een bepaald polymeer experimenteel te bepalen [91]. In een klassiek ‘single free phase’ absorptiemodel zijn de permeant moleculen niet aan het polymeer gebonden en kan de diffusiecoëfficiënt bepaald worden door vergelijking 1,

$$D = \pi * \left(\frac{wt}{4M_e} \right)^2 * \left(\frac{M_1 - M_2}{\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2}} \right)^2 \quad (1)$$

waarin M_1 en M_2 de opname percentage bij de tijd t_1 en t_2 weergeeft, wt = dikte van het testmonster is en M_e = opname in % in evenwichtstoestand bij saturatie [90].

In een experiment wordt een teststrook bij een bepaalde temperatuur aan de permeant blootgesteld. Op bepaalde tijden wordt de gewichtsverandering nauwkeurig gemeten. Vergelijking 2 is de stijging van het lineair gedeelte van de plot M_e tegen de wortel tijd.

$$\left(\frac{M_1 - M_2}{\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2}} \right) \quad (2)$$

Bij benadering kan de tijd tot stabilisatie bepaald worden door vergelijking 3. Deze methode geldt voor isotrope systemen met $wt \ll l$ en $wt \ll b$, waarin l = lengte van het monster en b = breedte,

$$t_{stab} = \frac{\pi}{16} * \frac{wt^2}{D} = \left(\frac{Me}{slope} \right)^2 \quad (3)$$

waarbij de slope = $(0,5 * S / \sqrt{tijd})$ (4)
en $S = Me * \text{dichtheid polymeer}$

Voor afwijkende teststroken wordt een correlatiefactor toegepast, weergegeven in vergelijking 4. In hoofdstuk 4 wordt een voorbeeld van deze methode uitgewerkt.

$$D_s = D * \left(1 + \frac{wt}{l} + \frac{wt}{b} \right)^{-2} \quad (5)$$

Tabel 12 geeft de invloed van tijd en verzachting door (water)opname weer. Bij toenemende dichtheid bijv. is de kristalliniteit verhoogd en neemt dus de sterkte van het polymeer toe. Toenemende kristalliniteit betekent ook een verhoging van de T_g en dus slechtere eigenschappen bij lage temperaturen. Wel verbeteren de eigenschappen bij hogere temperaturen. Bij verweking door (water)opname neemt de dichtheid af omdat de ketens verder weg van elkaar komen te liggen (door de doorbroken van der Waals bindingen) en dus wordt het polymeer zachter, de modulus neemt af.

Tabel 12 Invloed van tijd en permeanten

Veroudering	Dichtheid neemt toe	Dichtheid neemt af
	(2 ^{de} kristallisatie)	(verweking)
MFI	Hoger	Lager
ESCR	Slechter	Beter
Slagvastheid	Slechter	Beter
Sterkte	Hoger	Lager
Kristalliniteit/Dichtheid	Hoger	Lager
Modulus	Hoger	Lager
Kruip weerstand	Beter	Slechter
Eigenschappen bij lage temperaturen	Slechter (brosser)	Beter (minder bros)
Permeabiliteit	Lager	Hoger
Chemische resistentie	Beter	Slechter
Tg	Hoger	Lager
Vrij volume	Lager	Hoger

4 - 4.2 Hechting tussen matrix en vezel

Composieten absorberen vocht en water, in het bijzonder als de versterkende vezel van natuurlijke afkomst is. Het opgenomen vocht heeft een negatief effect op de matrix-vezel binding. Dat leidt tot verminderde overdracht van een opgelegde belasting. Afhankelijk van de chemische samenstelling van het polymeer is de hechting tussen vezel en polymeer al gegeven, bijvoorbeeld door dezelfde polariteit. Voor een betere hechting, of een echte chemische binding tussen vezel en polymeer kan een hechtmiddel, een zogenaamde sizing, worden aangebracht (zie hoofdstuk 2-3.6).

4 - 4.3 Coating tegen wateropname

Het is bekend dat hoe dikker de polymeerlaag hoe langzamer de wateropname verloopt. In principe kan ook een coating de wateropname vertragen. Er zijn niet veel coating systemen op de markt die gebaseerd zijn op hernieuwbare grondstoffen maar Rigo verf

bijvoorbeeld produceert een coating op basis van lijnolie en vlaszaden. Echter – als de coating van hetzelfde materiaal is als het matrixpolymeer zijn ook de maximale opname tot saturatie en de diffusie coëfficiënt hetzelfde. Voor een langdurige bescherming moet de diffusie coëfficiënt aanzienlijk lager zijn. Bovendien moet de coating minimaal 10% van de substraatdikte zijn om een merkbare vertraging van de wateropname te bereiken [92]. Over een periode van tientallen jaren kan een product niet tegen waterintrede beschermd worden.

Traditionele coatings, twee componenten lak systemen met UV blokkers zijn wel beschikbaar en vertragen het verouderingsproces.

4 - 4.4 Impact van ultraviolette straling

UV stralen zijn deel van het zonlicht spectrum. Er bestaan drie types UV stralen: UVA van 315 tot 380 nm, UVB van 280 tot 315 nm en UVC van 10 tot 280 nm. Omdat de atmosfeer van de aarde alle stralen onder 315nm absorbeert bestaat 99% van het UV licht uit UVA stralen [93]. Deze straling initieert radicale oxidatie processen waardoor zuurstof wordt ingebouwd in de ketens. Het sterk versimpelde mechanisme is gebaseerd op drie stappen [94]:

Initiatie: Polymeerketen P + hv -> polymeerketenradicaal P*

Propagatie: Het radicaal reageert met zuurstof O₂ tot zuurstofradicaal van polymeer POO*

$$P^* + O_2 \rightarrow POO^*$$

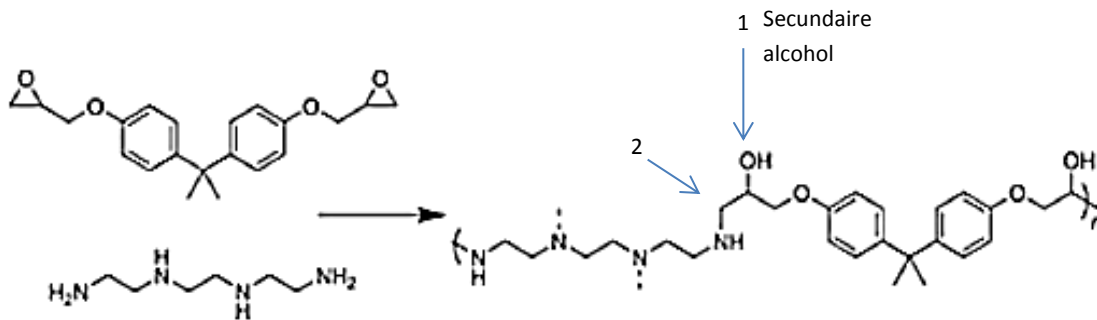
Dan attaqueert ROO* een polymeerketen met een waterstofatoom H en vormt een peroxide ROOH. Deze moleculen zijn niet stabiel en creëren nieuwe radicalen

$$POO^* + PH \rightarrow POOH + P^*$$

$$POOH \rightarrow ^*OH + PO^*$$

Terminatie: Twee polymeerketen met radicalen botsen op elkaar en beëindigen de reactie.

Voor epoxyharsen bijvoorbeeld is vanuit de organische scheikunde bekend [95] dat secundaire alcoholen (1) onder invloed van UV en zuurstof tot een carbonyl-functie reageren. Tevens kunnen de koolstofatomen gelegen naast een stikstof (2) onder UV en zuurstof in een radicaalreactie tot carbonylen reageren, afbeelding 42, waardoor de hele groep een amide wordt. Door deze verandering van structuur wordt de T_g verlaagd en veranderen de mechanische eigenschappen.

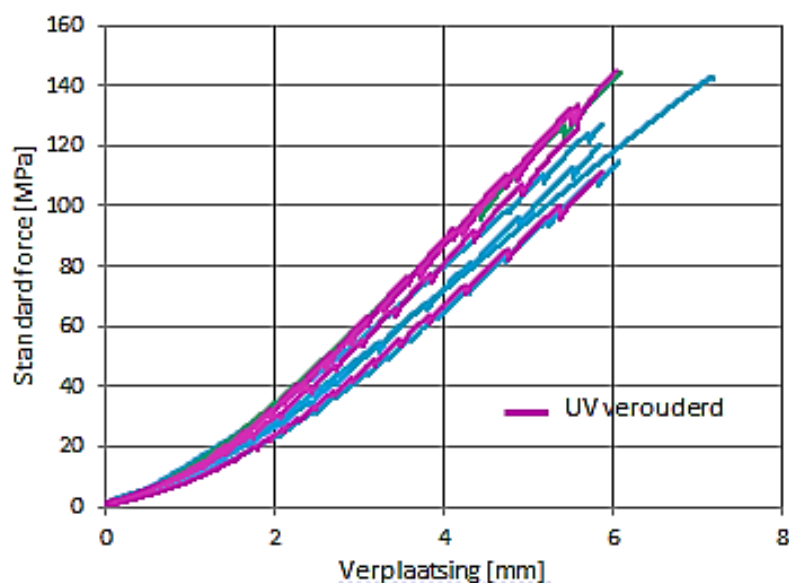


Afbeelding 42 Oxidatieve degradatie van organische moleculen

Reactie van de polymeerketens met peroxiden of vrije radicalen kan echter ook leiden tot breken van de polymeerketens als of een schaar de keten doormidden knipt. Ook zijtakken kunnen worden afgeknipt waardoor de dichtheid van het polymeer verandert [96]. De ketens komen dan dichter op elkaar te liggen en het polymeer lijkt in eerste instantie sterker te zijn geworden. Dit proces stopt pas als twee radicalen met elkaar reageren. Met voortschrijdende degradatie echter wordt de ketens steeds verder afgebroken en verliest het polymeer sterkte en stijfheid.

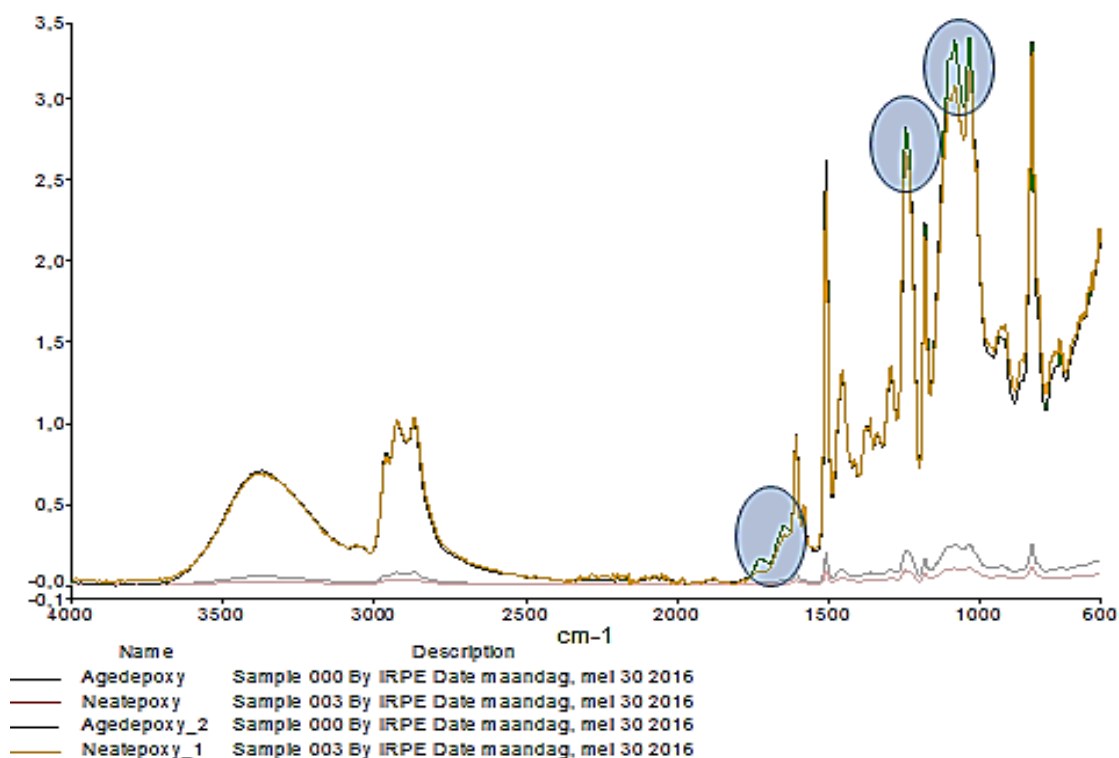
4 - 4.4.1 UV impact op Greenpoxy

UV straling kunnen een verouderingsreactie van polymeren starten. Door de fotonen worden radicalen geproduceerd die de polymeerketens verbreken. Grafiek 1 geeft het gedrag van greenpoxy niet verouderd en na 3 weken met intensieve UV straling (zie hoofdstuk Verantwoording) weer.



Grafiek 1 Stress - Strain curve Vlas-Greenpoxy standaard en verouderd door UV

Afbeelding 43 geeft de IR-spectra van onverouderd greenpoxy en UV bestaald Greenpoxy, waarbij deze van elkaar zijn afgetrokken, om verschillen duidelijk zichtbaar te maken.



Afbeelding 43 Infraroodspectrogram van een stukje epoxy polymeer voor en na blootstellen aan UV straling, genomen aan de TU Delft, L&R

Secundaire alcoholen kunnen onder invloed van UV en zuurstof tot een carbonyl-functie reageren. Tevens kunnen de koolstofatomen gelegen naast een stikstof onder UV en zuurstof in een radicaalreactie tot carbonylen reageren waardoor de hele groep een amide wordt. Carbonylen zijn in een IR spectrum bij een golfgetal van 1720 cm^{-1} , amiden bij 1651 cm^{-1} . Het genomen IR spectrum van de verouderde epoxy hars in vergelijking met de onverouderde hars laat weinig verschil zien. In deze methode zijn de spectra van elkaar afgetrokken. De buik helemaal aan het begin van het spectrum bij ca 3300 cm^{-1} laat zien dat de curven perfect op elkaar passen. In het andere deel van het spectrum, vanaf ca 1700 cm^{-1} zijn kleine verschillen waarneembaar.

Er zijn twee kleine nieuwe pieken te zien die op het ontstaan van zowel een carbonyl-groep als op een amide-groep kunnen wijzen. Net als het IR laat de trekkromme uit grafiek 1 maar marginale verschillen zien. 3 weken UV straling zijn dan eventueel voldoende om een reactie te starten maar nog niet voldoende een duidelijk moleculaire verandering of een zichtbare vermindering van de mechanische eigenschappen te detecteren.

4 - 4.5 Thermochemische degradatie

Onder thermochemische degradatie vallen chemische reacties door permeanten (dat kan dus ook hydrolyse zijn), thermolytische reacties door toegevoegde hitte en redoxreacties door oxidatoren en UV-stralen. Alle reacties hebben met elkaar gemeen dat de morfologie van de polymeerketens verandert doordat de ketens daadwerkelijk chemisch veranderen. Covalente bindingen worden verbroken i.p.v. de van der Waals bindingen in het voorafgaande hoofdstuk. In de meeste gevallen worden ketens verbroken door hitte en chemische processen. Door fotochemie is het echter ook, als hoge uitzondering, mogelijk om ketens in een radicaalreactie te verlengen. Er vindt dan een verdere polymerisatie plaats. Omdat dit proces zo zeldzaam is wordt het hier niet verder besproken.

In tabel 13 zijn de veranderingen opgenomen van de mechanische eigenschappen na thermolytische veroudering. Zoals gezegd moet men in dit geval ervan uitgaan dat ketens verbroken worden. Dat heeft twee effecten: ten eerste worden de ketens korter en wordt daardoor de dichtheid verhoogd. Maar door kortere ketens worden de van der Waals krachten kleiner en dus ook de modulus van het polymeer. Uiteindelijk, als de ketens steeds meer worden afgebroken, nemen ook de mechanische eigenschappen zichtbaar af.

Tabel 13 Thermochemische degradatie van polymeren

Veroudering (thermisch, UV, hydrolytisch, oxidatief)	Mw neemt af	Dichtheid neemt toe
MFI	Blijft hetzelfde in totaal	Hoger
ESCR	Slechter	Slechter
Slagvastheid	Slechter	Slechter
Sterkte	Eerst Hoger, dan lager	Hoger
Kristalliniteit	Eerst Hoger, dan lager	Hoger
Modulus	Eerst Hoger, dan lager	Hoger
Kruip weerstand	Slechter	Beter
Eigenschappen bij lage temperaturen	Beter	Slechter (bros)
Permeabiliteit	Hoger	Lager
Chemische resistentie	Slechter	Beter
Tg	Lager	Hoger
Vrij volume	Hoger	Lager



Vakwerkhuis in Bad Langensalza (Duitsland) met zichtbare constructie van hout en klei. Een dergelijke constructie is eigenlijk te beschouwen als dé oorspronkelijke bio-composiet. Enig minpuntje is het gebruikte hout, waarschijnlijk afkomstig van langzaam groeiende bomen.

(Foto: Sebastian Wallroth, 2004)

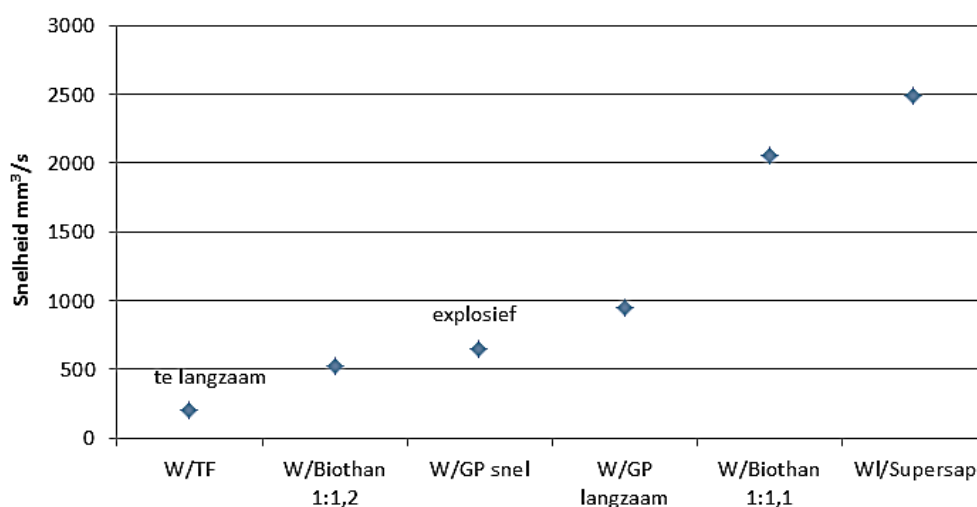
Hoofdstuk 5

Brug studie materialen

In een goed onderbouwd ontwerp moet rekening gehouden worden met verschillende eigenschappen van de materialen, zoals de doorstroming van harsen door de vezelpakketten ten behoeve van infusie-processen. Statische mechanische eigenschappen en de vermindering daarvan door veroudering zijn in de meeste gevallen slechts de basis voor verdergaande berekeningen voor specifieke constructies. In dit hoofdstuk worden de eigenschappen van de tegenwoordig in Europa beschikbare bio-harsen gegeven waarmee in het vervolg geconstrueerd kan worden

5 - 1 Vloei-eigenschappen combinaties

Voor de verwerkbaarheid van composieten in een vacuuminfusie-proces is het belangrijk te weten hoe goed de doorstroming van de hars door het weefsel is. In een vergelijk van Hennep vilt matten en verschillende harsen ontstaat het volgende beeld:



Grafiek 2 Injectiesnelheden van verschillende harsen door een weefsel van 2 mm dikte

Grafiek 2 laat onder anderen zien dat de doorstroming van Biothan sneller gaat met minder harder en dat Greenpoxy veel langzamer stroomt dan Supersap. De snelle harder voor Greenpoxy zorgt voor veel hitteontwikkeling en voor een snelle uitharding, waardoor het lijkt alsof de doorstroming langzamer gaat omdat de viscositeit toeneemt. Met de doorstroomsnelheid in combinatie met de langzame harder is de hars in een infusieproces goed te verwerken.

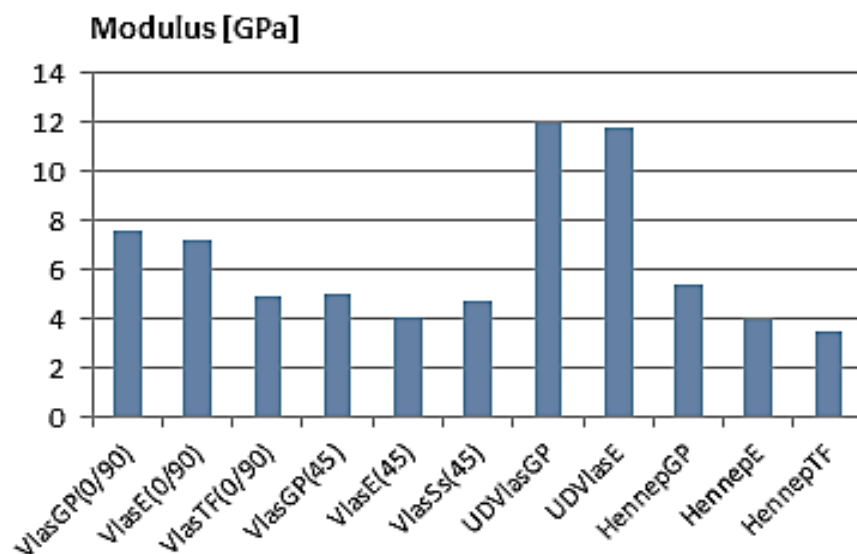
5 - 2 Materiaaleigenschappen combinaties

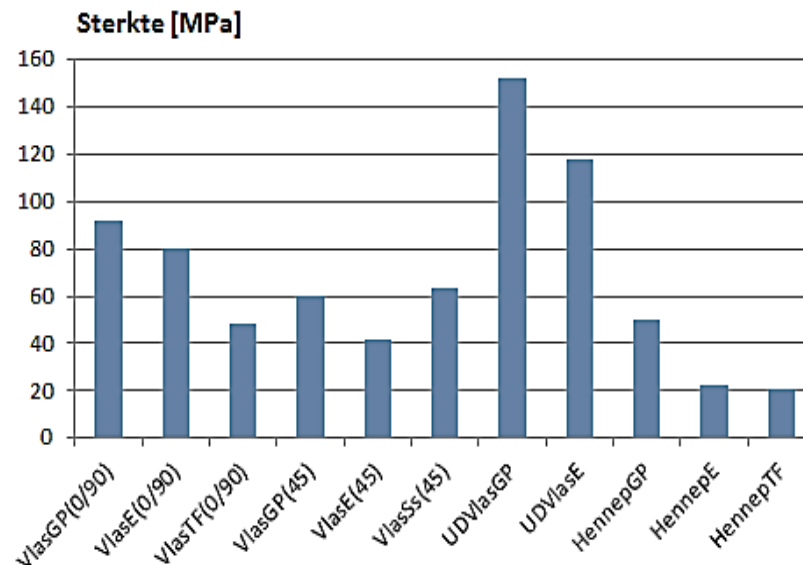
De trek-eigenschappen van de in Tabel 14 gegeven combinaties zijn in het vervolg beschreven.

Tabel 14 Composiet combinaties voor statische trektesten

Hennep	Vlas	Greenpoxy GP	Supersap Ss	Enviroguard E	Transfuran TF	Biothan
	(0/90)	Trek		Trek		
	(+/- 45)	Trek	Trek	Trek		
	UD					
non woven		Trek		Trek	Trek	
non woven		doorstroming	doorstroming	doorstroming	doorstroming	doorstroming

Grafieken 3a en 3b geven de E-modulus en de sterkte weer van de verschillende composiet combinaties. Het vlasweefsel composiet (0/90) met de epoxyharsen is in vergelijking met het transfuran en de gebruikte polyester sterker en stijver.





Grafiek 3a en 3b: Modulus en sterkte van de verschillende hars/vezelcombinaties

Dezelfde trend is ook te zien in het +/- 45 composiet. Hier zijn twee epoxys (Greenpoxy en Supersap) met elkaar en met de polyester vergeleken. De polyester is minder sterk en stijf; de epoxys lijken qua eigenschappen sterk op elkaar. In de UD combinatie is nauwelijks een verschil te zien; hier worden de eigenschappen door de vezel bepaald. In de viltmat ziet men weer heel duidelijk de betere eigenschappen van Greenpoxy in vergelijking met de andere harsen.

5 - 2.1 De beste keuze voor een brug

Een epoxy heeft duidelijk de beste eigenschappen en laat zich tevens goed verwerken. Het feit dat Greenpoxy ten opzichte van Supersap het hoogste bio-gehalte heeft, maakt Greenpoxy tot de enige echte alternatieve als hars in een min of meer 100% biobased brug. In het vervolg zal de vlas-greenpoxy combinatie verder onderzocht worden, met name op bestendigheid tegen water en UV.



Afbeelding 44 Vlasweefsel met greenpoxy

5 - 3 Materiaaleigenschappen vlas/greenpoxy

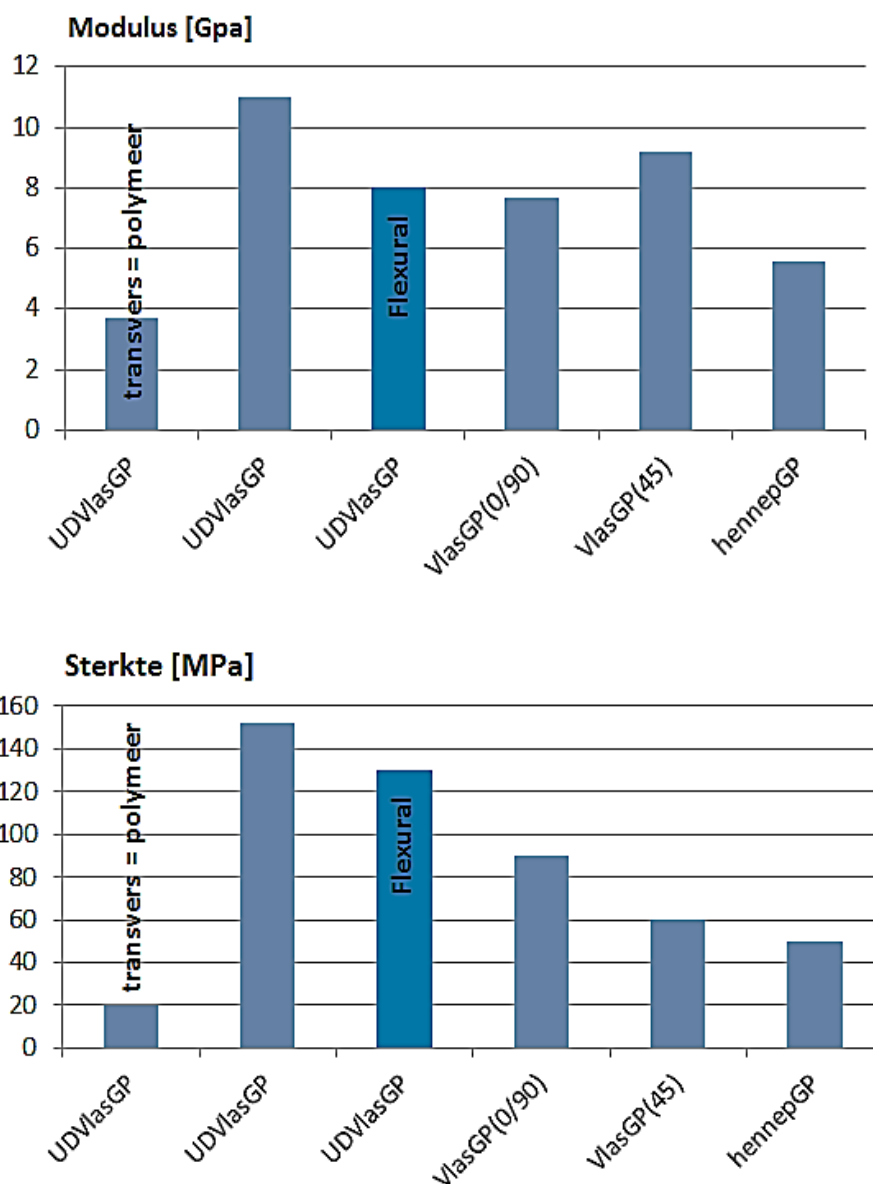
Een constructeur heeft te maken met gestelde opdrachten, waar altijd een pakket van eisen aan vast hangt. Ook in het geval van de bio-brug is dat het geval (zie Hoofdstuk 6). Een vlas-greenpoxy composiet voldoet aan de eisen 'biogehalte' en 'mechanische eigenschappen'. Voor constructieve berekeningen moeten de eigenschappen ook binnen het kader van de statistiek bepaald worden omdat een constructeur met bruikbaarheidsgrenzen rekent. Voor een toepassing in een buitenomgeving moet het materiaal tevens aan UV straling en vocht worden blootgesteld worden en moet er met de conversiefactoren rekening worden gehouden.

5 - 3.1 (Buig) Sterkte en (Buig) Modulus

Grafiek 4a en 4b geven de eigenschappen stijfheid en sterkte van vlas/ greenpoxy composiet [97], [98]. Een trektest in transverse richting van het laminaat levert de polymeereigenschappen omdat de vezelversteking ontbreekt. Greenpoxy heeft een gemiddelde stijfheid van 3,8 GPa en een gemiddelde sterkte van 20MPa. Een trektest in vezelrichting levert de modulus (11 GPa) en de sterkte (150 MPa) van de vezel/polymeer combinatie in één richting. Een buigproef levert de buigmodulus (8 GPa) en buigsterkte (150 MPa) van deze combinatie. De 0/90 weefsel laminaten laten verminderde stijfheid en sterkte zien.



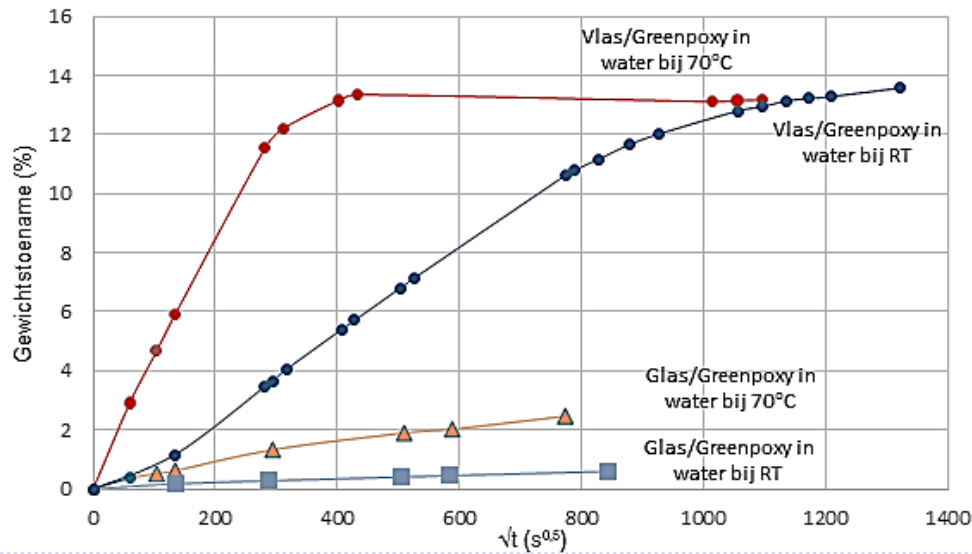
Afbeelding 45 Faalmodus trektest van een vlas/greenpoxy sample [99]



Grafiek 4a en 4b: Modulus en sterkte van vlas/greenpoxy combinaties

5 - 3.2 Wateropname en diffusie coëfficiënt

Mechanische eigenschappen veranderen als het polymeer of de vezel verandert. In de hoofdstukken 2 en 4 werd besproken hoe polymeer en vezel door wateropname veranderen. Een polymeer wordt zachter en de vezel zwelt. Voor de mechanische eigenschappen van het composiet betekent dit een vermindering van sterkte en modulus wat in vorm van conversiefactoren door de constructeur in de berekeningen meegenomen moet worden. Als de wateropname en resulterende eigenschappen niet bekend zijn, moeten deze eerst bepaald worden. Grafiek 5 laat een typisch verloop van de wateropname van vlas/greenpoxy composiet met de tijd zien.



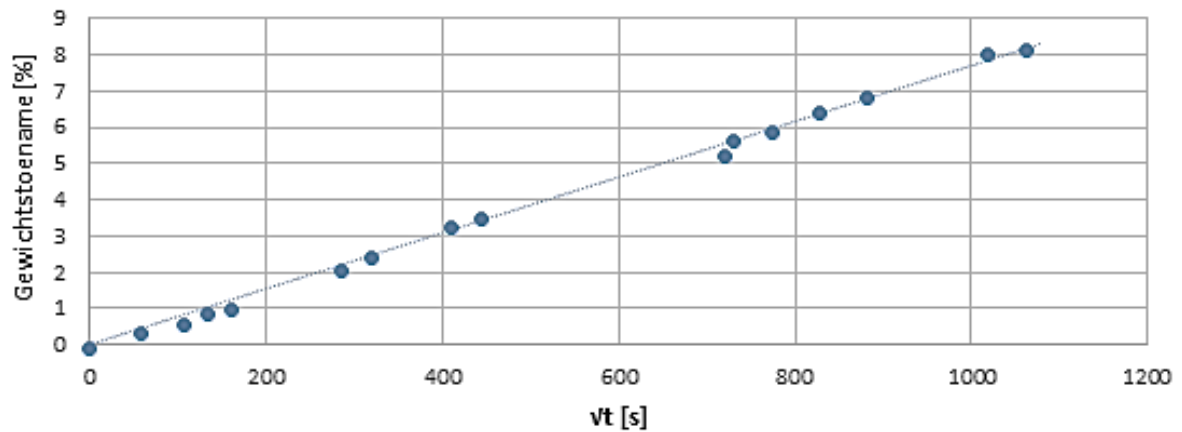
Grafiek 5 Gewichtstoename door water van vlas-Greenpoxy versus glas-Greenpoxy

Wateropname is een typisch geval van Fick'sche diffusie waarbij het water in eerste instantie snel in een constante rate wordt opgenomen tot de opname af vlakkt door verzadiging van het polymeer. Met verhoogde temperatuur verloopt het proces sneller en kan het punt van verzadiging bepaald worden. Composiet van vlas-greenpoxy is bij 70°C na 2,1 dagen verzadigd. De wateropname bij kamertemperatuur van vlas-Greenpoxy verloopt volgens de Fick'sche opname principe. Aan de kurve in grafiek 5 is te zien dat de verzadiging na ca 23 dagen is bereikt omdat de level van verzadiging bekend is. Een vlas-greenpoxy UD laminaat neemt ca 13% toe aan gewicht door opname van water. Kanttekening bij dit proces is dat teststroken volgens ASTM D3039 trek test afmetingen gebruikt zijn zodat de mechanische eigenschappen ook na verzadiging bepaald kunnen worden en voor verzadiging volledig onder water gedompeld zijn. Daarmee wordt de opname versneld doordat water van 6 kanten in het laminaat kan trekken. Onderstaande tabel geeft de volgens vergelijking (4) bepaalde diffusie coëfficiënten van vlas/Epoxy in vergelijking met glas/epoxy.

Tabel 15 Diffusie coëfficiënten

Materiaal	70°C/RT	Wt_{av}	L_{av}	b_{av}	Slope	M_e	Diffusie coefficient	D met correctie factor
		[mm]	[mm]	[mm]	Vergl (4)	[%]	D [mm ² /s]	Dx [mm ² /s]
Vlas-GP	70	1,88	200	19,85	0,0421	14,8	$5,65 \cdot 10^{-6}$	$4,64 \cdot 10^{-6}$
Vlas-GP	RT	1,89	200	19,87	0,0134	14,8	$5,75 \cdot 10^{-7}$	$4,70 \cdot 10^{-7}$
Glas-GP	70	1,62	200	19,86	0,0046	2,5	$1,75 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-6}$
Glas-GP	RT	1,66	200	19,97	0,0008	2,5	$5,54 \cdot 10^{-8}$	$4,65 \cdot 10^{-8}$

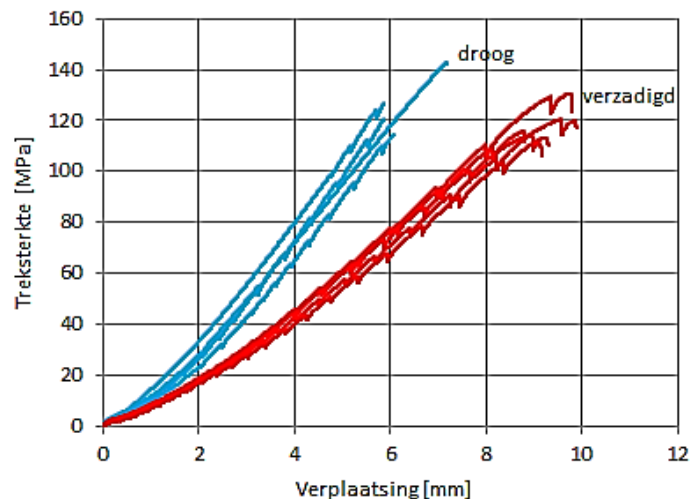
Een meer realistische methode is door het water slechts via één kant te laten indringen [98], zie grafiek 6. Bij een permeatie van alle kanten gaat de verzadiging bijna twee keer zo snel, na 16 dagen is het materiaal met 14% door wateropname aan gewicht toegenomen, terwijl het materiaal bij een intrede van één kant na 16 dagen nog maar 8% aan gewicht heeft toegenomen.



Grafiek 6 Gewichtstoename van Vlas-Greenpoxy door water in pot bij 70°C

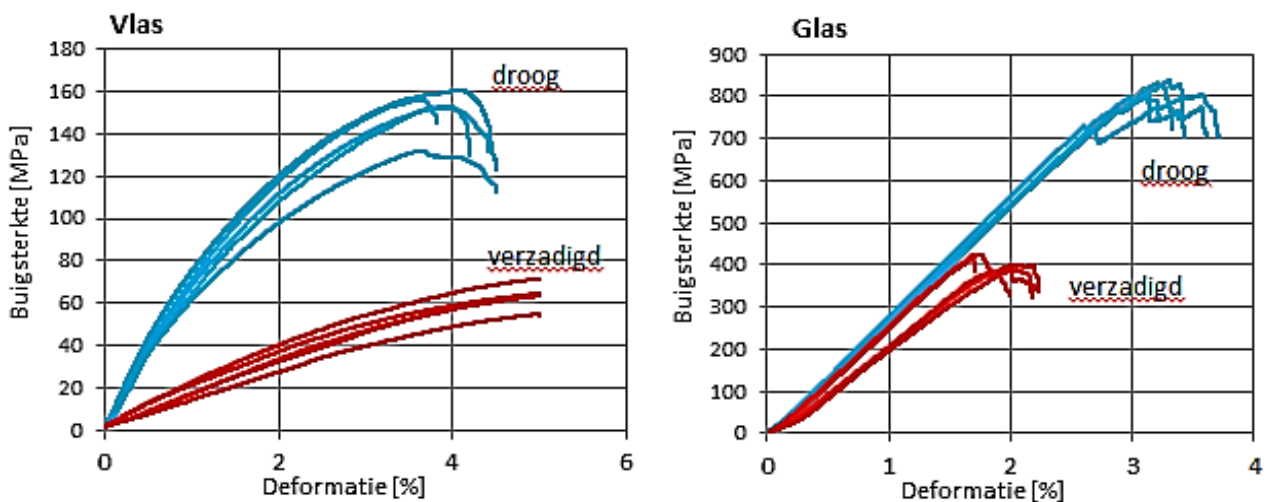
5 - 4 Statische eigenschappen na wateropname

De mechanische eigenschappen van een laminaat verminderen geleidelijk met de hoeveelheid opgenomen water tot het maximum bereikt is. Het is interessant om dit experimenteel te vervolgen en vast te leggen maar uiteindelijk zijn alleen de resulterende eigenschappen belangrijk voor de constructeur. In grafiek 7 is duidelijk te zien dat de sterkte van met water verzadigd vlas/greenpoxy composiet weinig verandert maar de stijfheid minder wordt en de rek toeneemt.



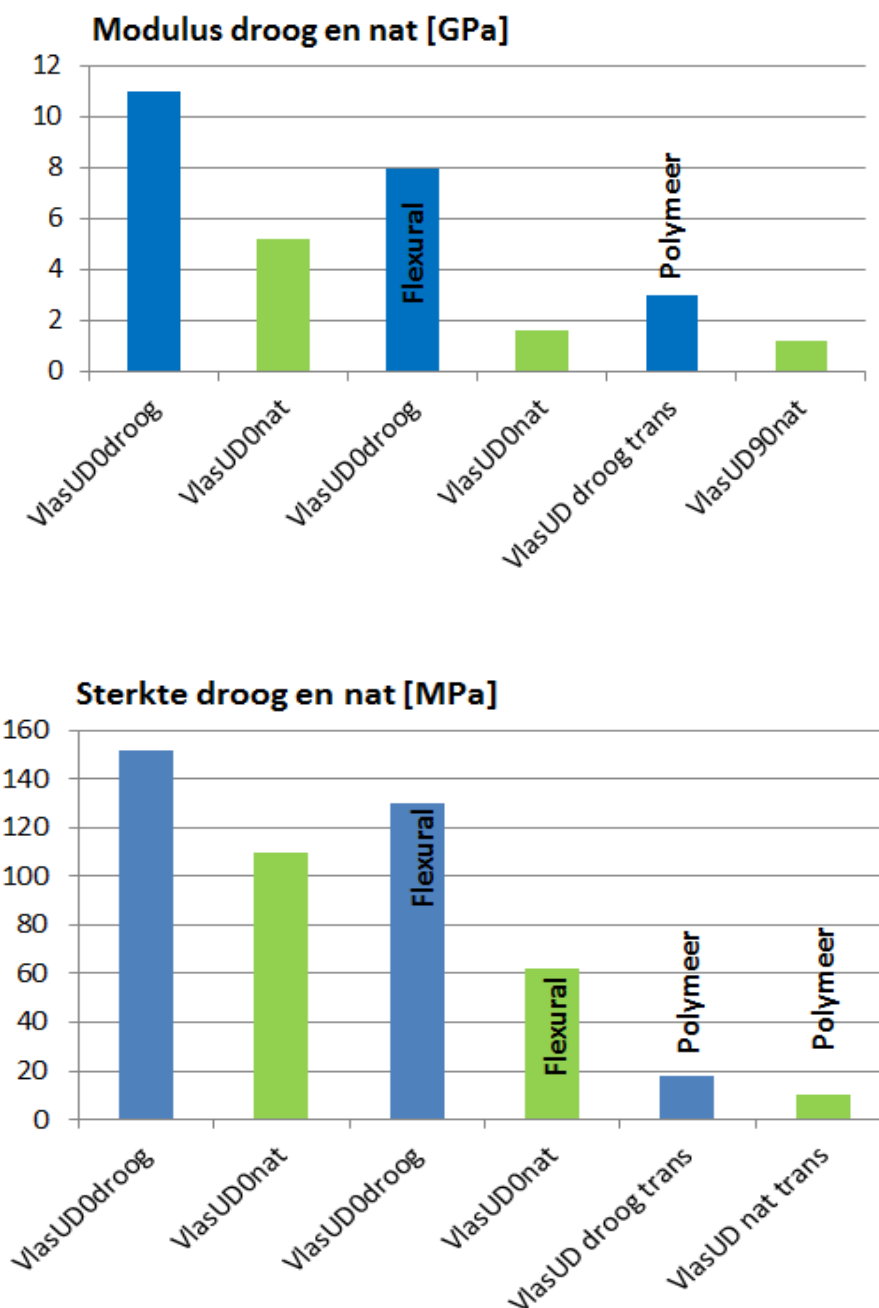
Grafiek 7 Treksterkte van een VlasUD met greenpoxy voor en na verzadiging door water

De buigsterktes van vlas-greenpoxy neemt daarentegen door de wateropname af. Een vergelijking van de testcurves vlas-epoxy met glas-epoxy laat zien dat andere mechanismen wellicht oorzaak zijn van de vermindering van de mechanische eigenschappen.



Grafieken 8a en 8b Buigsterkte van een vlasUD met greenpoxy (links) voor en na verzadiging door water in vergelijking met glas/greenpoxy (rechter grafiek)

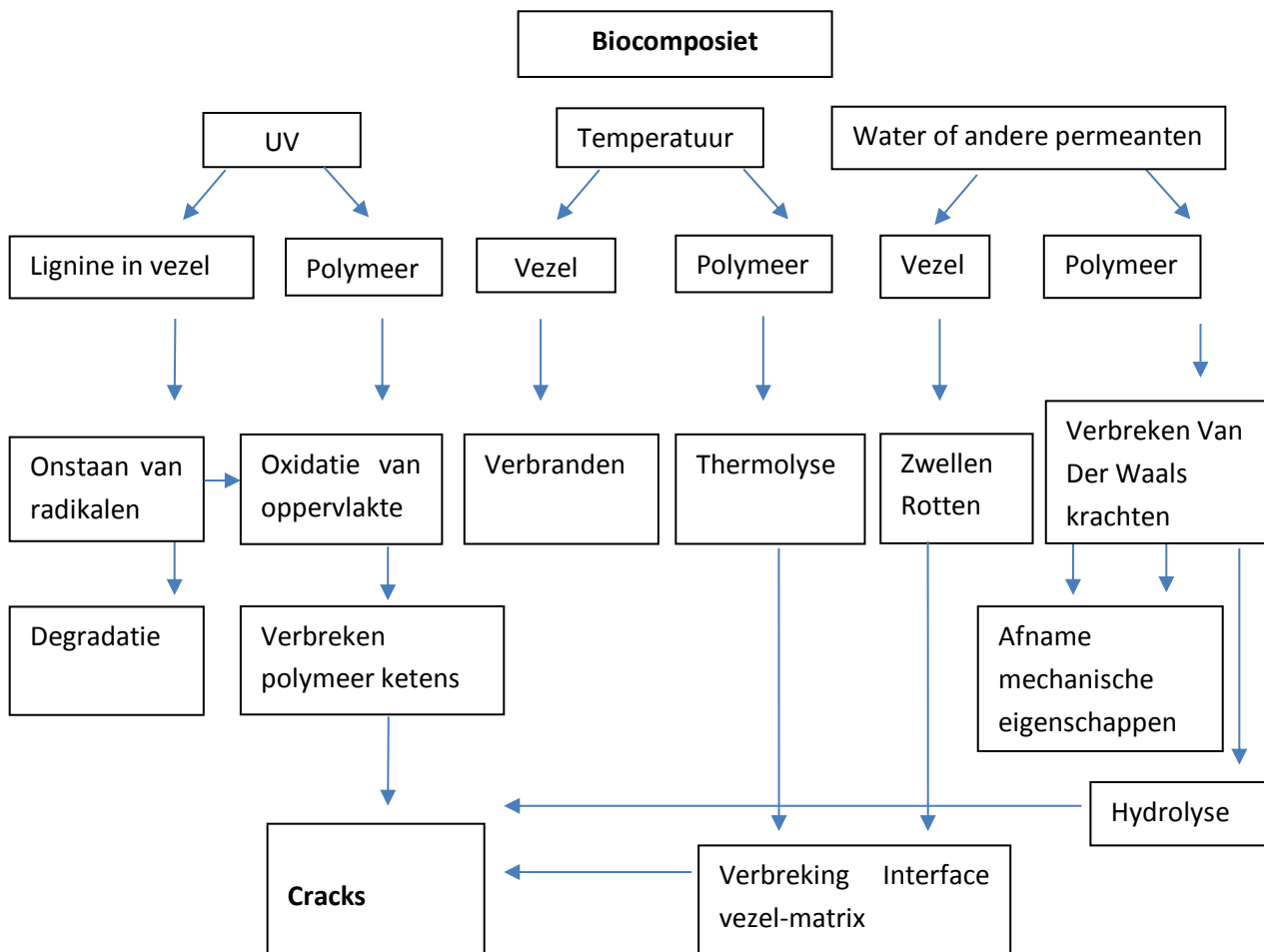
Het polymeer zal zich in beiden gevallen hetzelfde gedragen en toch zien de curves er eclatant verschillend uit. Mogelijke oorzaken kunnen zijn het bezwijken van de glas-sizing enerzijds en/of het veranderen van de vlasvezel anderzijds. Onderstaande grafieken 9a en 9b geven de eigenschappen samenvattend weer.



Grafieken 9a en 9b Overzicht trek- en buigeigenschappen vlasUD/Greenpoxy voor en na verzadiging met water

5 - 5 Degradatie bio-composieten samengevat

In een composiet combineren de eigenschappen van de vezel en het polymeer. Een composiet waarin het polymeer blootgesteld wordt aan bovengenoemde invloeden zal beschermd moeten worden als de eigenschappen om constructieve of esthetische redenen behouden moeten blijven. Onderstaand schema geeft alle degradatiemechanismen schematisch weer.



Afbeelding 46 Schema Degradatiemechanismen

Constructies, gemaakt van bio-composiet zijn minstens 1,5 - 2 jaar tegen weersinvloeden beschermd, mits zij van een onbeschadigde coating laag met UV blokker voorzien zijn. De extra laag verlangzaamd het proces van waterintrede in het materiaal. Teststroken die in een klimaatkast (6 weken overeenkomstig met 1,5 - 2 jaar Nederlands buitenklimaat) versneld verouderd werden ondersteunen deze theorie [99]. Het is voor Bio-composieten nog onbekend hoelang het duurt, onder normale Nederlandse weersomstandigheden, voordat het verouderingsproces inzet.



Deze bank is één van een aantal die op verschillende plekken in de gemeente Haarlemmermeer geplaatst zijn. De eerste twee banken staan sinds april 2016 op Schiphol Plaza. De huid van de bankjes is van bio-composiet, bestaande uit hennep en vlas wat in het gebied bij de start- en landingsbanen van Schiphol geteeld wordt. Ook olifantsgras wordt daar geteeld en na het oogsten verwerkt in beton, waarmee de bankjes gevuld zijn. De bankjes zijn een samenwerking van de gemeente Haarlemmermeer, Schiphol, Miscanthusgroep, Hogeschool Inholland, Strukton, HempFlax en TSG Group.

Hoofdstuk 6

Ontwerpen met bio-composieten

Het gedrag van bio-based composieten op lange termijn is nog onbekend. De eisen die gesteld worden aan constructies zijn vastgelegd in besluiten, normen en standaarden. Er zijn echter nog geen normen verplicht gesteld die beschrijven op welke wijze een (bio)-composiet constructie ontworpen en getoetst moet worden.

Met bijdragen van Koert Dingerdis en Rijk Blok

Bio-based composieten kunnen in principe in allerlei producten in de verschillende technieksectoren worden toegepast. Zoals in de bouw, scheepsbouw, werktuigbouw, auto-industrie, luchtvaartindustrie. In afbeelding 47 is een voorbeeld van producten weergegeven die (deels) vervaardigd zijn met bio-based composieten. Bio-based composieten worden tot op heden voornamelijk toegepast in een experimentele omgeving.



Afbeelding 47 Biocomposiet scooter (SIA RAAK Project 2010),
<http://sofa.innoventuri.com/media/>

6 - 1 Functionele eisen

Een bijdrage van Drs. Koert Dingerdis, docent-onderzoeker civiele techniek. Hogeschool Inholland/Alkmaar

Het is belangrijk om te realiseren dat alle producten, dus ook bio composieten, moeten voldoen aan functionele eisen. Eén van deze eisen is dat het product in staat moet zijn om de belastingen die op het voorwerp werken, in het geval van normaal gebruik, veilig te dragen zonder dat de functie van het voorwerp verloren gaat. In het geval van de bio-scooter, moet het frame in staat zijn om de belasting van de bestuurder af te dragen naar de wielen. Het frame van de bio-scooter is dus de draagconstructie. Bij bruggen is deze functie nog beter zichtbaar. De vorm van de constructie laat zien hoe de belastingen die op de brug werken worden afgedragen door de constructie naar de ondergrond.

Voor het goed functioneren van een draagconstructie moeten eisen worden gesteld aan de betrouwbaarheid en de bruikbaarheid. Om in de terminologie te blijven van bouwwerken (gebouwen en bruggen) wordt gesproken over twee grenstoestanden namelijk [12]:

- Uiterste grenstoestand¹; aan een constructie zijn eisen gesteld ten aanzien van de veiligheid. De constructie mag binnen bepaalde grenzen niet bezwijken.
- Bruikbaarheidsgrenstoestand; aan een constructie zijn eisen gesteld ten aanzien van de bruikbaarheid, comfort, en duurzaamheid. De functie van een constructie mag tijdens het gebruik niet verloren gaan door bijvoorbeeld grote vervormingen of hinderlijke trillingen.

In Nederland zijn de eisen die gesteld worden aan bouwconstructies vastgelegd in het Bouwbesluit. Het Bouwbesluit verwijst vervolgens naar de bijhorende regelgeving de Eurocode normen. In de Eurocode NEN-EN 1990 'Grondslagen van het ontwerp' staan bijvoorbeeld beschreven aan welke eisen t.a.v. de (combinatie van) belastingen incl. bijhorende veiligheid een bouwwerk moet voldoen. In de Eurocode NEN-EN 1991 'Belastingen op constructies' staan de belastingen beschreven die op een bouwwerk werken. Een belangrijk detail is dat het bouwbesluit alleen eisen stelt aan de constructieve veiligheid maar niet uit het oogpunt van bruikbaarheid. Echter worden in de Eurocode normen wel regels gegeven voor de bruikbaarheidsgrenstoestand. Bijvoorbeeld in de vorm van een maximale vervormingseisen van een constructie(onderdeel). Deze eisen zijn opgenomen omdat in het algemeen het niet acceptabel is dat een constructie veilig is maar niet bruikbaar.

Er zijn echter nog geen normen verplicht gesteld die beschrijven op welke wijze een composiet bouwwerk ontworpen en getoetst moet worden. Maar er zijn wel richtlijnen.

¹ "De grenstoestand is een begrip uit de mechanica bij het berekenen van bouwconstructies. Bij overschrijden van de *uiterste grenstoestand* treden in bouwconstructies blijvende vervormingen op, d.w.z. bij het opheffen van de belastingen keert de constructie niet meer terug naar de oorspronkelijke vorm en is breuk van het materiaal nabij. De uiterste grenstoestand zorgt ervoor dat de constructie niet bezwijkt onder extreme belastingen en dat de veiligheid van de constructie dus behouden blijft. Belangrijke aspecten zijn de weerstand en de stabiliteit van de constructie" [119].

In Nederland is er bijvoorbeeld de CUR 96 [100]. In deze richtlijn worden ontwerpregels gegeven voor voornamelijk glasvezel versterkte composieten. In Europees verband is er een voornorm in 2016 gepubliceerd [101]. Ook in deze voornorm worden voornamelijk regels gegeven voor glasvezel- en koolstofvezelversterkte composieten. Naast deze normen zijn er nog diverse andere normen en richtlijnen. Specifieke richtlijnen die ontwerpregels geven voor het ontwerpen van bouwwerken gemaakt van bio-based composieten bestaan nog niet. Dat betekent niet dat de bestaande richtlijnen zoals [101] en [100] niet gebruikt kunnen worden. Alleen moet men zich bewust zijn van de karakteristieke materiaaleigenschappen en de gegeven regels op de juiste wijze interpreteren. Bijvoorbeeld zijn bio-based composieten gevoeliger voor vochtname dan glasvezelcomposieten. Voor het bepalen van rekenwaarden van de materiaaleigenschappen moet de ontwerper hiervan op de hoogte zijn en de betreffende materiaalfactoren hierop aanpassen in de ontwerpberekeningen.

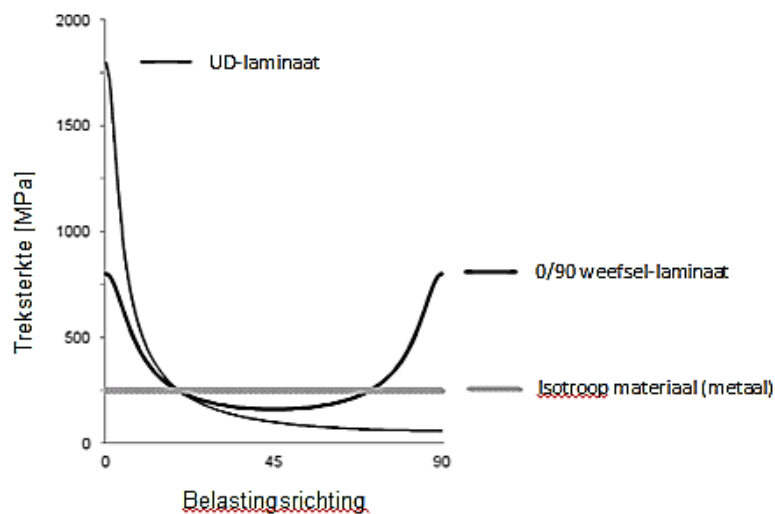
6 - 2 Het ontwerp van een laminaat

Een bijdrage van Drs. Koert Dingerdis, docent-onderzoeker civiele techniek. Hogeschool Inholland/Alkmaar

Het ontwerpen met bio-composieten zal niet heel anders zijn dan met niet bio-based composieten. Ook de faalmechanismen waarmee rekening moet worden gehouden zijn voor bio-based composiet niet anders dan voor conventionele composieten. Een (bio-)composietenlaminaat is opgebouwd uit lamellen van vezels en hars. De wijze waarop het laminaat wordt belast en de opbouw van het laminaat, de verhouding tussen hars en vezels en de richting van vezels, bepalen uiteindelijk hoe het laminaat bezwijkt.

6 - 2.1 De vezeldraad

De richting van de vezeldraad bepaalt de eigenschappen van het composiet. In een isotroop materiaal zijn de eigenschappen in alle richtingen hetzelfde (zie metaal lijn in Afbeelding 48). In een composiet zijn de eigenschappen afhankelijk van de vezelrichting. Zo is de sterkte van een laminaat opgebouwd uit UD lagen relatief heel hoog, maar alleen in de richting van de vezels (0-richting). Een laminaat opgebouwd uit 0/90 weefsels moet de sterkte over twee richtingen verdelen en geeft daarom relatief lagere breukspanningen in de richtingen 0 en 90 [102]. Voor het ontwerpproces is het daarom belangrijk om te weten in welke richting de belasting komt te staan.



Afbeelding 48 Treksterktes in afhankelijkheid van de vezel oriëntatie

Het grote verschil tussen de vezeldraad van glas of koolstof ten opzichte van bio-based vezels is dat glas en koolstof vezels continu gewikkeld zijn terwijl de bio-vezel aan elkaar gedraaide kortere vezels van max. 1 m lengte zijn. Daarmee is de vezel quasi-continu en heeft een hogere spreiding van eigenschappen. De twist in de vezel komt terug na wateropname.

6 - 2.2 Faalmechanismen

In de literatuur zoals [12], [103], [104] worden de verschillende faalmechanismen en de bijhorende theorie besproken. De theorie is algemeen geldig voor composieten.

Splijten: Wanneer de vezels overwegend in één richting lopen, en de hechting dwars op de vezels onvoldoende is, kan een composiet relatief gemakkelijk splijten. Bij splijten ontstaan er scheuren in het composiet, parallel aan de vezels, en door de gehele dikte van één of meer lamellen [12].

Delaminatie: Delaminatie lijkt veel op splijten, de scheuren lopen nu echter in het vlak van het laminaat tussen twee lamellen [12].

Knik: Knikken is een faalmechanisme dat optreedt in slanke elementen belast met een normaaldrukkracht. Deze elementen verplaatsen zich in de slappe richting. Dit faalmechanisme kan ook op vezelniveau optreden.

Vermoeiing: Door een wisselende langeduurbelasting, met name de belastingamplitude en aantal belastingwisselingen, gaan de mechanische eigenschappen van het composiet na verloop van tijd achteruit. Als gevolg daarvan kan scheurvorming en scheurgroei ontstaan in het composiet. Dit kan uiteindelijk leiden tot breuk.

Kruip: Door een constante (of constant deel van de wisselende) langeduurbelasting treedt na verloop van tijd een toename van de vervorming van het composiet op. Naarmate er een relatief grote constante lange duurbelasting op de constructie aanwezig is, is het mogelijk dat er kruipbreuk optreedt.

6 - 2.3 Conversiefactoren

De mechanische eigenschappen van composieten worden sterk beïnvloed door de omgeving waarin het materiaal wordt toegepast. In een vochtig milieu worden de mechanische eigenschappen nadelig beïnvloed ten opzichte van een droog milieu. Daarnaast worden de mechanische eigenschappen beïnvloed door de aard van de belasting op een constructie. Onderscheid kan gemaakt worden tussen een wisselende en constante belasting. Om deze invloeden in rekening te brengen moeten de mechanische eigenschappen worden gereduceerd in ontwerpberekeningen. In de ontwerpnormen [100], [101] worden de mechanische eigenschappen van composieten met zogenaamde conversiefactoren gereduceerd. Deze normen zijn hoofdzakelijk opgesteld voor het ontwerpen en berekenen van civieltechnische en bouwkundige constructies. Deze ontwerpnormen maken onderscheid in de volgende conversiefactoren (volgens notatie van [101]):

- η_{ct} is de conversiefactor die temperatuureffecten in rekening brengt;
- η_{cm} is de conversiefactor die vochteffecten in rekening brengt;
- η_{cv} is de conversiefactor die tijdseffecten (kruip) in rekening brengt;

- η_{cf} is de conversiefactor die langeduur belastingswisselingen (vermoeiing) in rekening brengt.

De totale conversiefactor die in rekening moet worden gebracht volgt uit:

$$\eta_c = \eta_{ct} \cdot \eta_{cm} \cdot \eta_{cv} \cdot \eta_{cf}$$

Afhankelijk van de toets moet een conversiefactor worden meegenomen. In tabel 16 is aangegeven welke conversiefactoren met elkaar moeten worden meegenomen volgens ontwerpnorm.

Voor thermohardende polymeren is kruip verwaarloosbaar; in de combinatie met een vezelversterking moet rekening gehouden worden met de vervorming van de natuurlijke vezel op basis van tijd en vocht. Voor kruip kan de conversiefactor voor hout als indicatie voor vlasvezels worden aangehouden.

Op basis van literatuur met verkennend vermoeiingsonderzoek blijkt het een veilige benadering te zijn om de helling van de vermoeiingscurves voor composieten met vlasvezels gelijk aan te houden aan die van composieten met glasvezels. De in de CUR 96 aanbevolen helling voor $R=-1$ bij ontbreken van specifieke meetgegevens is $k=-9$ voor glas-polyestercomposiet en $k=-10$ voor glas-epoxy-composiet [9], [105].

Met de factor temperatuur moet rekening gehouden worden als met thermoplasten ontworpen wordt, die met stijgende temperatuur een lagere modulus krijgen. Thermohardende polymeren zijn minder gevoelig voor temperatuurvariaties, zeker als de temperaturen beneden de glastemperatuur blijven. Voor vlas-epoxy in de meeste buitentoepassingen mag dit aangenomen worden, ook al stijgt de temperatuur op donkere oppervlakken (wegdek) in de zomer tot $> 60^\circ\text{C}$.

Zoals in de voorafgaande hoofdstukken beschreven is vocht een factor met sterke invloed op het composiet, gemaakt van natuurlijke vezels. De wateropname van composieten wordt door verschillende factoren bevorderd, zoals temperatuur, vezel-matrix verhouding, vezel oriëntatie, permeabiliteit vezel en matrix, oppervlakte en wel of niet aangebrachte bescherming. In een composiet wordt de modulus van de matrix lager. De vezels zwellen op door het opgenomen water waardoor spanningen ontstaan die in de degradatie van de vezel-matrixpolymeer hechting kunnen resulteren. Die spanningen leiden verder tot microscheurtjes waardoor de wateropname verder bevorderd wordt. Het water kruipt tussen de matrix en de vezel waardoor uiteindelijk de hechting tussen vezel en matrixpolymeer volledig kan bezwijken. Door wateropname moet met een afname voor de mechanische eigenschappen van ca 50% voor de sterkte en 75% voor de modulus gerekend worden [52] [32]. Samengevat kan wateropname van de vezel leiden tot beperkingen voor toepassingen van natuurlijke vezels.

De mate waarin dit gebeurt is van geval tot geval afhankelijk van het polymeer-vezel systeem omdat alle polymeren op een specifiek wijze water absorberen. Op dit moment zijn het aantal studies over conversiefactoren van vlas-epoxy composieten beperkt waardoor het aan te raden is de conversiefactor η_{cm} te bepalen uit testen.

Tabel 16 Conversiefactoren per aspect

Te verifiërende aspect							
Factor	Sterkte (ULS)	Stabiliteit (ULS)	Vermoeiing (ULS)	Kruip (SLS)	Deformatie (SLS)	Trillingen (SLS)	Schade (SLS)
η_{ct}	x	x	x	x	x	x	x
η_{cm}	x	x	x	x	x	x	x
η_{cv}	x	x		x			x
η_{cf}		x		x	x	x	x

De conversiefactor wordt berekend door de waarde van de betreffende eigenschap van het verzadigde materiaal te delen door de waarde van de eigenschap van het droge materiaal. Voor de combinatie vlas-UD met Greenpoxy uit hoofdstuk 5-4 resulteren volgens de mechanische eigenschappen in met water verzadigde toestand onderstaande conversiefactoren; Soortgelijke getallen worden ook in andere studies gevonden [105].

Tabel 17 Conversiefactoren voor vocht, berekend uit de testresultaten

	[GPa]	Conversiefactor η_{cm}
Modulus droog	11	0,47
Modulus nat	5,2	
Buigmodulus droog	8	0,2
Buigmodulus nat	1,6	
Sterkte droog	0,13	0,85
Sterkte nat	0,11	
Buigsterkte droog	0,13	0,46
Buigsterkte nat	0,06	

6 - 2.4 Vezel-matrix ratio

De vezel/matrixratio is een ontwerpparameter en bij non bio-gebaseerde composieten makkelijk te bepalen door van een gewogen stukje laminaat de hars van de glas vezels weg te branden en de resterende vezels opnieuw te wegen.

Met de mengselwet kan eenvoudig de E-Modulus en treksterkte van een UD-lamel in de (0°) en (90°) richting bepaald worden, afhankelijk van het vezelvolume percentage:

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{1}{\frac{E_f}{V_f} + \frac{1-V_f}{E_m}} \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (8)$$

Waarin:

E_1 = E-Modules van de lamel in 1-richting

E_f = E-Modules van de vezel

E_m = E-Modules van de matrix

σ_1 = Breukspanning van de lamel in 1-richting

σ_f = Breukspanning van de vezel

σ_m = Spanning in matrix als σ_f maximaal is

V_f = Vezel volume fractie ($0 < V_f < 1$)

Bij bio-gebaseerde systemen kan de vezel/matrix ratio niet op deze manier bepaald worden omdat de vezels al bij ca. 200°C verbranden, wat in de meeste gevallen veel lager is dan de verbrandingstemperatuur van de harsen. Een mogelijkheid kan zijn om bij benadering de hoeveelheid hars ten opzichte van de hoeveelheid vezel te gebruiken of door middel van microscopie vezels (en insluitsels zoals luchtbelletjes) te tellen en naar het volledige laminaat te extrapoleren.

6 - 2.5 Productie van een laminaat

Voor de productie belangrijke eigenschappen zoals viscositeit en pot-life zijn sterk afhankelijk van de verschillende factoren temperatuur, druk, tijd, permeabiliteit vezel, concentratie harder, concentratie katalysator, type harder. Het is onmogelijk om alle varianten binnen dit kader te onderzoeken en te documenteren, te meer als het onderzochte systeem bij verschijnen van dit document al weer van de markt verdwenen zou kunnen zijn.

In principe verschillen de productiemethodes niet van de methodes om standaard composieten [12] te verwerken. Echter, er zijn enkele bijzonderheden waarmee men rekening moet houden.

6 - 2.5.1 Vochtgevoeligheid

Wateropname resulteert in veranderde fysische, mechanische en thermische eigenschappen. Polymeer composieten absorberen vocht en water, in het bijzonder als de versterkende vezel van natuurlijke afkomst is. De te verwerken vezels zouden van tevoren gedroogd kunnen worden maar tijdens de productie en in de toepassing nemen de vezels weer vocht op.

Een andere reden echter, de vezel van tevoren te drogen is een eventuele reactie van de hars met vocht. greenpoxy wordt vernet met een isocyaan, wat ook met water kan reageren. Is de vezel te vochtig, dan reageert een onbepaalde hoeveelheid harder met het vocht in plaats van met de hars. Daardoor bereikt de hars niet de maximale vernetting en dus ook niet de verwachte sterkte en stijfheid.

Om dezelfde reden is het verstandig om ook de hars voor de productie te ontluchten; hierbij verdwijnt ook het merendeel van het vocht uit de hars.

6 - 2.5.2 Viscositeit

Afhankelijk van het productieproces moet er rekening gehouden worden met de viscositeit. Echter, de viscositeit verschilt per hars-harder systeem en de hoeveelheid toegevoegde harder. Tevens is de commerciële beschikbaarheid bio-gebaseerde harsen zo dynamisch dat harsen die er nu zijn wellicht volgend jaar niet meer op dezelfde manier verkrijgbaar zijn. Het beste is dus om met de leverancier af te stemmen welke hars-harder combinatie het meest geschikt zal zijn voor het gekozen productieproces en de viscositeit op te vragen of te meten als dit noodzakelijk is.

6 - 2.5.3 Exotherme processen

Bij het verwerken van thermoharder moet er rekening gehouden worden met exotherme pieken. De vernettingsreactie loopt in eerste instantie vertraagd om de pot-life te waarborgen. Als de reactie is gestart komt warmte vrij die snel kan oplopen tot hoge temperaturen, zelfs boven de ontstekings temperatuur van de hars. Koeling van het reactievat is aan te raden.

Bij dikkere pakketten laminaat kan de hitte niet meer afgevoerd worden en lopen de temperaturen hoog op (zie afbeelding 34). Een spontane ontvlaming kan daarbij optreden.

6 - 2.5.4 Porositeit

In het productieproces kunnen luchtbellen ontstaan die porositeit kunnen veroorzaken. Luchtbellen zijn onwenselijk omdat zij het permeatie proces van vocht of andere invloeden versnellen.

6 - 2.6 Hoe maakt men nu de keuze voor de juiste materialen?

In elk geval moet men de afweging maken dat natuurvezels niet tot de high-tech sector behoren. Dat betekent voor de keuze van een bijpassend polymeer dat dit eveneens in de commodity sector te zoeken is. Het betreft een toepassing in het buiten dus daarmee vallen thermoplasten met een lage T_g af. Natuurvezels zijn polair en liefst niet voorbehandeld. In dat geval vallen apolaire polymeren zoals polyethyleen en polypropyleen af. Welke productie faciliteiten zijn aanwezig? De meeste persen voor thermoplastische materialen bijvoorbeeld zijn niet geschikt om grote voorwerpen zoals een brug te produceren. Daarvoor is speciaal gereedschap nodig zoals voor de automobiellindustrie waar hele autocarosserieën in een robotarmbeweging kunnen worden gevormd. Pultrusieprocessen zijn eveneens voorstelbaar zoals door het bedrijf Fiberline wordt gebruikt om composieten bruggen te produceren.

Door dit eliminatieproces te gebruiken: geen lage T_g of smeltpunt, polair, vacuüm infusie, is de keuze aan polymeren beperkt. Een polymeer keuzetool, samengesteld door de Hogeschool van Amsterdam is digitaal beschikbaar [106] om uit de veelheid van polymeren op basis van eigenschappen een keuze te kunnen maken.

6 - 3 Ontwerpconcepten

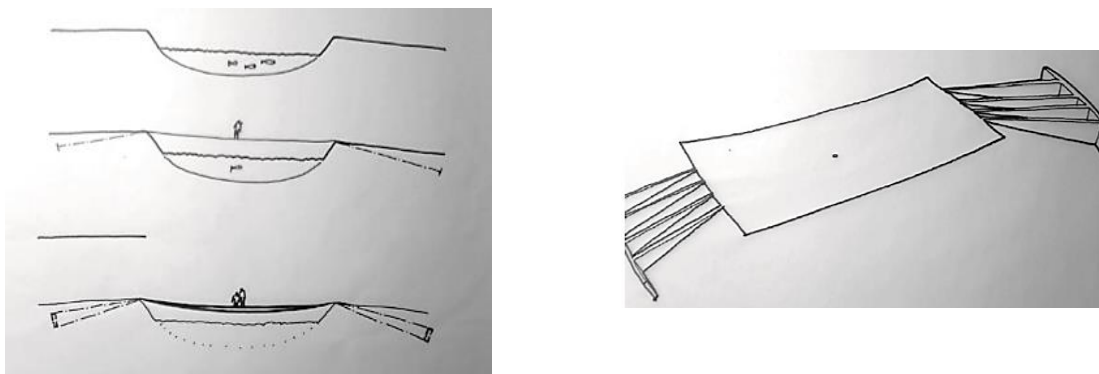
Een afweging van verschillende ontwerpen

Een bijdrage van Drs. Koert Dingerdis, docent-onderzoeker civiele techniek. Hogeschool Inholland/Alkmaar

In het Raakproject bio-based composietbrug is in samenwerking met onderwijsinstellingen, onderzoeksinstituten en bedrijven gewerkt aan de ontwikkelen van een volledig bio-based composiet fiets- en voetgangersbrug. In dit project is gekeken naar verschillende constructievormen om de brug te maken. Als uitgangspunt was gesteld om de constructievorm zodanig aan te passen dat de materiaaleigenschappen van het biocomposiet zoveel mogelijk benut worden. Gedurende het project zijn in workshops meer dan 20 ontwerpvarianten van de fiets- en voetgangersbrug opgesteld. In deze casestudy worden op hoofdlijnen de verschillende ontwerpvarianten besproken. Om het gedrag van de constructie te analyseren is in het begin gewerkt met parametrische modellen en ontwerpformules waarmee de krachtwerking onderzocht is. Uit alle ontwerpvarianten kunnen vier basis constructie principes worden onderscheiden, namelijk:

- buigligger met een trekkracht
- voorgespannen kabelbrug
- boog
- buigligger

Als startpunt voor de uitwerking van de casestudie is het originele ontwerp van de bio-based brug gebruikt. In het originele ontwerp is gesteld dat de draagconstructie zo eenvoudig mogelijk moet zijn en een verbinding moet vormen tussen twee oevers. Voorgesteld is om het brugdek uit te voeren als een dunne schaalconstructie die tussen twee landhoofden wordt gespannen. De landhoofden moeten op hun beurt de trekkracht uit het brugdek overbrengen naar de ankers die in de naastgelegen ondergrond moeten worden aangebracht. Met het voorgestelde constructieprincipe zijn de materiaaleigenschap van het gekozen biocomposiet, vezels van vlas, volledig benut. Vlas vezels zijn immers beter in staat om trekkrachten op te nemen dan drukkrachten.



Afbeelding 49 Schetsontwerpbrug Bron [107]

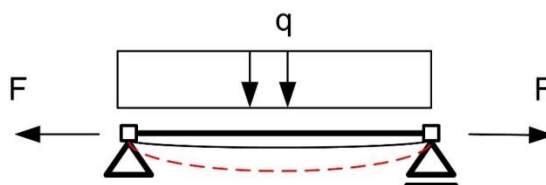
6 - 3.1 Buigligger met trekkracht

Dit constructieprincipe is vaker toegepast. Een voorbeeld van dit typebrug is in Stuttgart-Vaihingen Duitsland gebouwd, afbeelding 50. Het betreft een fiets- en voetgangersbrug uitgevoerd in beton met een overspanning van 37,0 meter met een constructiehoogte van slechts 18,0 cm. Met dit type brug is het dus mogelijk om met een geringe constructiehoogte grote overspanningen te maken. De relatieve slankheid van deze brug is 1:206.



Afbeelding 50 “Spannbandbrücke” in Stuttgart-Vaihingen te Duitsland
Bron: mayr-ludescher.com

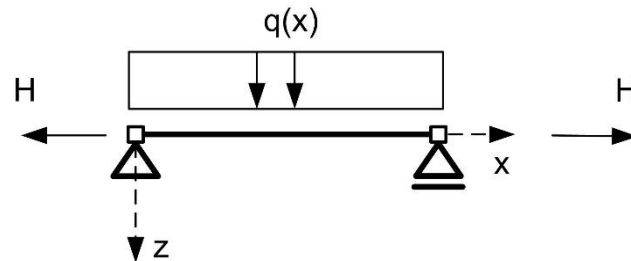
De ligger wordt belast loodrecht op zijn as maar ook door een axiale trekkracht. Je kunt in deze ligger twee draagwerkingen onderscheiden namelijk een buigligger en een kabel, afbeelding 51. Door de belasting loodrecht op de as van de ligger wil de ligger naar beneden vervormen. Deze vervorming (gestippelde lijn) wordt vervolgens tegengegaan door de trekkracht. Deze trekkracht zorgt ervoor dat de ligger om hoog wil verplaatsen, de getrokken lijn.



Afbeelding 51 doorbuiging buigligger belast met een trekkracht

6 - 3.1.1 Wiskundige uitwerking buigligger met trekkracht

Van een ligger die scharnierend opgelegd is op twee steunpunten belast door een gelijkmatig verdeelde belasting $q(x)$ en een trekkracht H is het mechanica schema in afbeelding 52 gegeven.



Afbeelding 52 Mechanica-schema ligger

De differentiaal vergelijking die de buigligger beschrijft is gegeven door:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} - H \frac{d^2 w}{dx^2} = q(x) \quad (9)$$

Waarin:

- E de elasticiteitsmodulus in kN/m^2
- I traagheidsmoment in m^4
- w verplaatsing in m
- H trekkracht evenwijdig aan de as van de ligger in kN
- q belasting loodrecht op de as van de ligger in kN/m
- x beschouwde punt op de staaf tussen begin en eindpunt van de staaf in m

In de onderstaande opsomming zijn 4 functies gegeven die respectievelijk de algemene oplossing van vergelijking 9 geven voor de verplaatsing, hoekverdraaiing, momenten, en dwarskrachten.

$$w(x) = C1 e^{\alpha x} + C2 e^{-\alpha x} + C3 + C4 x - \frac{qx^2}{2H} \quad (10)$$

$$\varphi(x) = C1 \alpha e^{\alpha x} - C2 \alpha e^{-\alpha x} + C4 - \frac{qx}{H} \quad (11)$$

$$M(x) = EI \left(C1 \alpha^2 e^{\alpha x} + C2 \alpha^2 e^{-\alpha x} - \frac{q}{H} \right) \quad (12)$$

$$V(x) = EI \left(C1 \alpha^3 e^{\alpha x} - C2 \alpha^3 e^{-\alpha x} \right) \quad (13)$$

waarin:

$C1, 2, 3, 4$ onbekende integratieconstanten

$$\alpha \quad \text{is een factor} \sqrt{\frac{H}{EI}}$$

Om de algemene oplossing van vergelijkingen 10 t/m 13 te vinden moeten vier randvoorwaarden gevonden worden. Uit het mechanica schema, afgebeeld in [Afbeelding 52](#), is duidelijk af te leiden dat de momenten ter plaatse van de opleggingen nul moet zijn. Dit omdat immers daar geen inklemmingsmoment kan ontstaan het betreft een scharnierende en een roloplegging. Door in vergelijking 12 de randvoorwaarden te substitueren, $x = 0 \rightarrow M = 0$ en $x = L \rightarrow M = 0$, kunnen de integratieconstanten C1 en C2 worden opgelost. Na enige wiskundige bewerking volgt eruit dat integratieconstanten C1 en C2 gelijk zijn aan:

$$C1 = -\frac{q(e^{-\alpha L} - 1)}{H\alpha^2(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})} \quad C2 = \frac{q(e^{\alpha L} - 1)}{H\alpha^2(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})}$$

De integratieconstanten C3 en C4 moeten nog worden opgelost. Uit [Afbeelding 52](#) is duidelijk af te leiden dat de verplaatsing van de ligger boven de twee steunpunten gelijk aan nul moet zijn. Immers kunnen beide opleggingen verticaal niet verplaatsen. Door in vergelijking 10 de twee randvoorwaarden te substitueren, $x = 0 \rightarrow w = 0$ en $x = L \rightarrow w = 0$ en de bekende integratieconstanten C1 en C2 kunnen de nog onbekende integratieconstanten C3 en C4 worden gevonden. Na enige wiskundige bewerking volgt eruit dat integratieconstanten C3 en C4 gelijk zijn aan:

$$C3 = -\frac{q}{H\alpha^2} ; \quad C4 = \frac{Lq}{2H}$$

Door de vier bekende integratieconstanten in vergelijking 10 t/m 13 te substitueren is voor het mechanica-schema, zoals weergegeven in [afbeelding 52](#), de specifieke oplossing gevonden. Met deze specifieke oplossingen kunnen de verplaatsing, hoekverdraaiing, momenten, en dwarskrachten eenvoudig met een parameter studie worden bestudeerd. De functie om de verplaatsingen en momenten te bepalen is gegeven door:

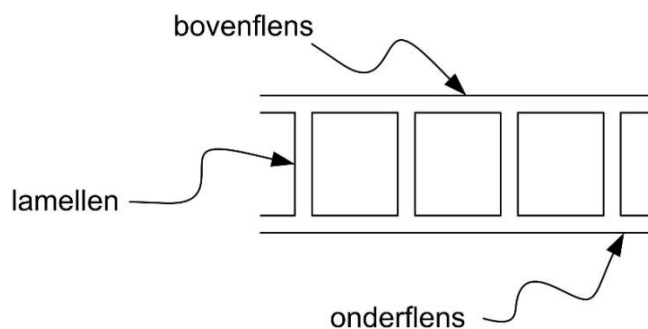
$$w(x) = -\frac{q(e^{-\alpha L} - 1)e^{\alpha x}}{H\alpha^2(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})} + \frac{q(e^{\alpha L} - 1)e^{-\alpha x}}{H\alpha^2(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})} - \frac{q}{H\alpha^2} + \frac{Lqx}{2H} - \frac{qx^2}{H} \quad (14)$$

$$M(x) = EI \left(-\frac{q(e^{-\alpha L} - 1)e^{\alpha L}}{H(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})} + \frac{q(e^{\alpha L} - 1)e^{-\alpha L}}{H(e^{\alpha L} - e^{-\alpha L})} - \frac{q}{H} \right) \quad (15)$$

Dit draagsysteem is onderzocht met een parameterstudie. De relatie tussen de trekkracht, doorbuiging en de trekspanningen in het brugdek is onderzocht. In [Grafiek 10](#) en [Grafiek 11](#) zijn de resultaten weergegeven. In deze beschouwing is de overspanning als variabel genomen. De doorsnede van het brugdek, de buigstijfheid van het composiet, de boven

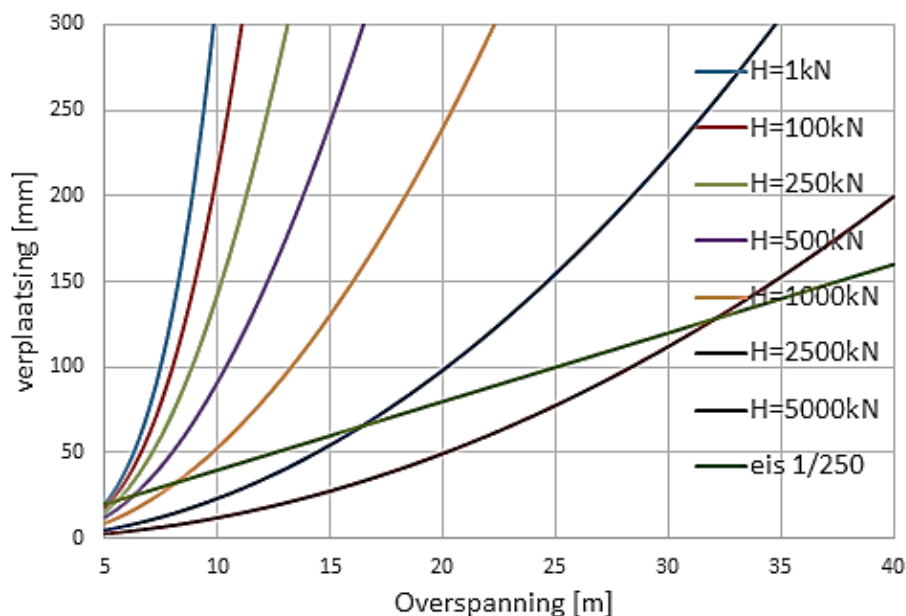
belasting op het brugdek is als een constante aangenomen. Door de overspanning te variëren in relatie met een constante hoogte van het brugdek varieert de relatieve slankheid tussen de 1:25 en 1:200.

De analytische uitwerking van de ligger met een trekkracht is met behulp van Maple software [108] berekend. In de berekening is een bovenbelasting van fietsers en voetgangers van 5 kN/m^2 aangehouden, een E-modulus van 10 GPa , een hoogte van het dek 200 mm , de boven- en onderflens hebben een dikte van 10 mm en de lamellen een dikte van 10 mm hart op hart 250 mm . Er is een vrij opgelegde ligger op twee steunpunten beschouwd. Voor een doorsnede van het dek zie afbeelding 53.



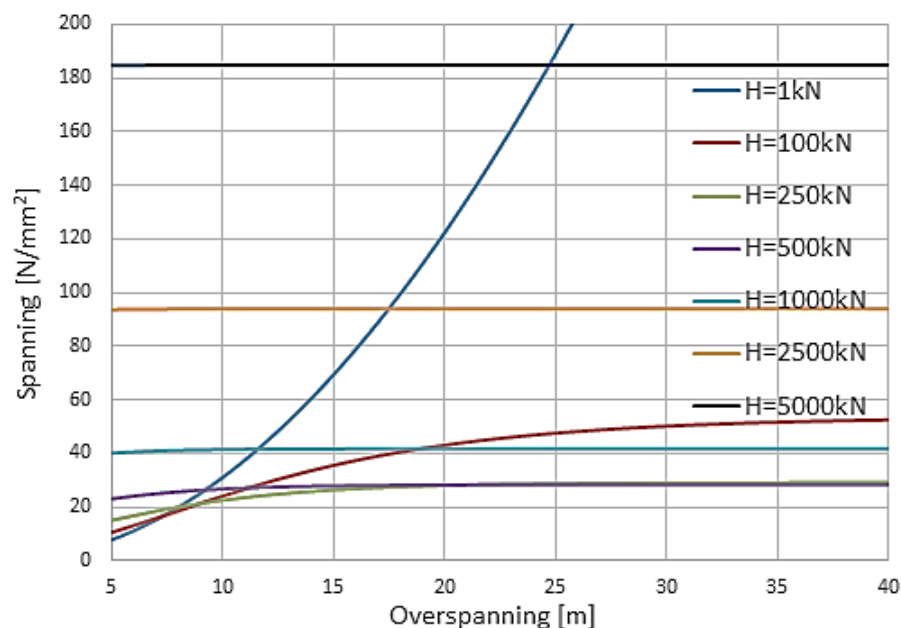
Afbeelding 53 Doorsnede brugdek

Uit grafiek 10, zie trekkracht $H=5000 \text{ kN}$, volgt dat de verplaatsing pas bij een significante hoge trekkracht in voldoende mate wordt gereduceerd om aan de gestelde eis te voldoen. In dit voorbeeld is uitgegaan van een maximale verplaatsing van een 1:250 van de lengte van het brugdek ten gevolge van de belasting uit fietsers en voetgangers.



Grafiek 10 Relatie tussen verplaatsing en de overspanning van het brugdek

In grafiek 11 is de relatie gegeven tussen de overspanning van het brugdek en de gecombineerde buig-trekspanningen in het midden van het brugdek. De spanningen zoals weergegeven in de grafiek zijn opgebouwd uit buig- en trekspanningen van respectievelijk het buigend moment en de trekkracht. Uit de grafiek volgt dat al bij een relatief lage trekkracht de buigspanning aanzienlijk worden gereduceerd, zie grafiek trekkracht $H=100$ kN. Naarmate de trekkracht groter wordt, zie grafiek trekkracht $H=2500$ kN, is de buigspanning te verwaarlozen ten opzichte van de trekspanningen.



Grafiek 11 Relatie tussen overspanning en gecombineerde buig-trekspanning van de brug

Uit de studie blijkt dat er een relatief grote trekkracht aangebracht moet worden om de verplaatsingen in voldoende mate te beheersen en de spanningen in het brugdek voldoende te reduceren. Om dat mogelijk te maken moet de fundering, het landhoofd, in staat zijn om deze kracht op te nemen en af te dragen naar de ondergrond. Indien deze kracht niet direct naar de ondergrond af gedragen kan worden, zoals bij een rotsbodem, dan ontkomt men niet aan in de bodem aangebrachte verankering. Bij de Nederlandse bodemopbouw, overwegend klei, veen en zandgronden, is dat het geval. De consequentie is dat een zware funderingsconstructie met verankering in de bodem aangebracht moet worden. In het kader van het Raakproject is het niet gewenst om de funderings- en verankeringsconstructies uit te voeren met de regulieren materialen zoals beton en staal is. Om een volledig bio-based constructie te ontwerpen is het dus wenselijk om de funderings- en verankeringsconstructie uit te voeren met bio-based composieten. Of dit mogelijk is, is geen uitgebreid onderzoek naar gedaan. Het is dan ook zeer de vraag of deze ontwerpvariant met de huidige staat van de kennis van bio-based composieten voor de Nederlandse situatie mogelijk is.

6 - 3.2 Kabelbrug

Als tweede ontwerpvariant is een voorgespannen kabelbrug (voorgespannen hangbrug) beschouwd. Dit type constructies wordt vooral in het buitenland veelvuldig gebruikt. Een voorbeeld van dit type brug is in afbeelding 54 weergegeven. Het betreft de hangbrug Geierlay-Hängeseilbrücke in Duitsland. Het is een voetgangersbrug uitgevoerd in staal met een overspanning van circa 360 meter op een hoogte van 100 meter.



Afbeelding 54 Hangbrug de Geierlay-Hängeseilbrücke in Rijnland-Palts Duitsland.

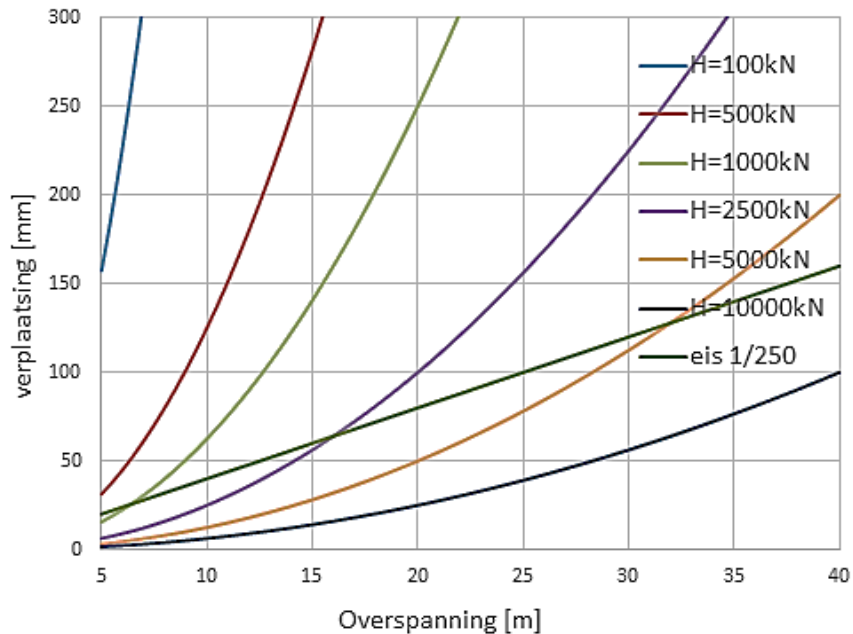
Bron: <http://www.steenenhoeve.nl/189838666>

Bij een hangbrug wordt tussen twee landhoofden een kabel gespannen. Het brugdek wordt vervolgens bevestigd aan deze kabels. De belasting uit het dek wordt naar de kabels afgedragen. De kabels dragen op hun beurt de belasting uit het dek af naar de landhoofden. De landhoofden moeten de belasting uit de kabels naar de ondergrond afdragen. Met dit constructieprincipe wordt het materiaal in de kabels volledig benut, qua materiaalgebruik is deze constructievorm zeer gunstig.

Om een indruk te krijgen van de relatie tussen de trekkracht en de doorbuiging van het brugdek is een parameterstudie uitgevoerd. In grafiek 12 zijn de resultaten weergegeven. In deze beschouwing is de overspanning als variabele genomen. De bovenbelasting en de voorspankracht op het brugdek is als constante aangenomen. In de berekening is een gelijkmatig verdeelde belasting van 5 kN/m aangehouden.

Uit de grafiek, zie trekkracht $H=5000$ kN, volgt dat de verplaatsing pas bij een significante hoge trekkracht in voldoende mate wordt gereduceerd om aan de gestelde eis te voldoen. In dit voorbeeld is gegaan van een maximale vervorming van het brugdek van 1:250 van de overspanning ten gevolge van de belasting uit fietsers en voetgangers.

Uit deze berekeningen blijkt dat dezelfde problematiek, een relatief zware funderingsconstructie, als bij een buigligger met een trekbelasting aan de orde is. Om deze reden is deze variant in verband met de typische Nederlandse bodemopbouw afgefallen.



Grafiek 12 Relatie tussen verplaatsing en de overspanning van het brugdek

6 - 3.3 Boogbrug

Als derde ontwerpvariant is een boogbrug beschouwd. Dit type constructies is in Nederland veelvuldig toegepast. Een voorbeeld van dit type brug is in afbeelding 55 gegeven. Het betreft de wandelbrug Ooijpoort in Nijmegen. Het is een voetgangersbrug uitgevoerd in composiet met een overspanning van circa 60 meter.



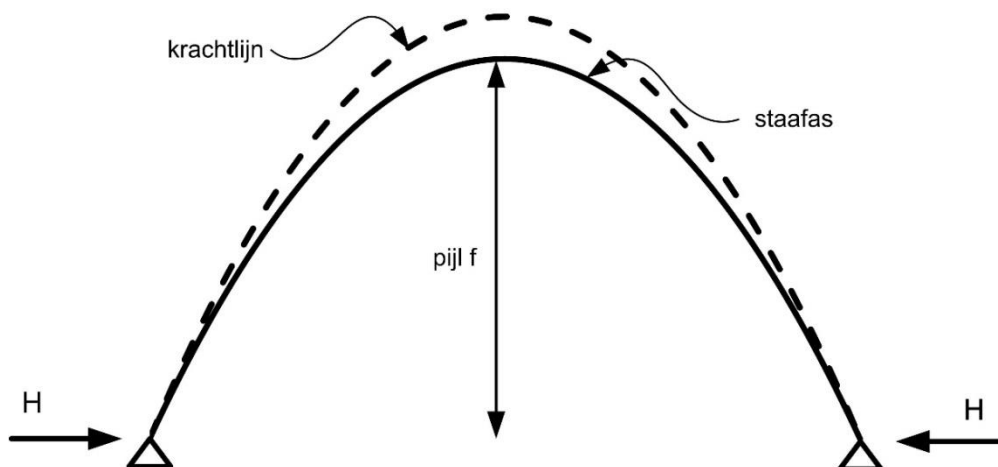
Afbeelding 55: Boogbrug Wandelbrug Ooijpoort in Nijmegen

Boogbrug gerealiseerd door Infracomposites, Meerdink Bruggen en Olaf Gispen Architecten.

Bron: <https://whmgipman.wordpress.com>

Bij een boogbrug is de krachtswerking van de boog hoofdzakelijk gebaseerd op een drukkracht. Naast het feit dat een boog een axiale stijfheid bezit heeft een boog ook een buigstijfheid. Op deze wijze kan de boog ook een buigend moment opnemen. Wanneer de krachtlijn niet exact samenvalt met de staafas, maar nog wel binnen de kern van de doorsnede blijft, is in de hele doorsnede van de boog nog drukkracht aanwezig, zie afbeelding . Met dit constructieprincipe wordt het materiaal in de boog volledig benut.

Qua materiaalgebruik is deze constructievorm gunstig. Echter wordt knikstabiliteit van een slanke constructie maatgevend waarbij het materiaal nog niet volledig benut is.



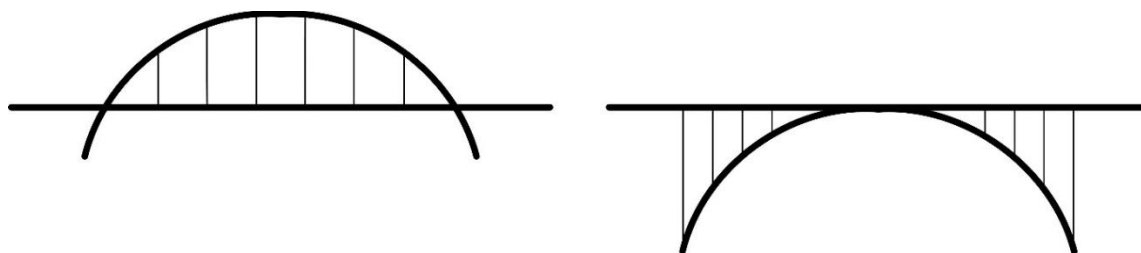
Afbeelding 56 Krachtenlijn in een boog

Bij de opleggingen van de boog treedt, afhankelijk van de pijl, een grote horizontale reactiekracht op. De reactiekracht volgt uit de onderstaande vergelijking waarbij de samendrukking van de boog is verwaarloosd:

$$H = \frac{ql^2}{8f} \quad (16)$$

Waarin, q is de boven belasting op de boog, l is de overspanning en f is de pijl van de boog. De pijl f heeft een grote invloed op de grote van de horizontale reactiekracht H . Wanneer bij een gelijkblijvende overspanning de pijl kleiner wordt neemt de reactiekracht H toe. Als de boog benut wordt als rijdek, de simpelste vorm van een boogbrug, dan moet de pijl kleiner worden gekozen zodanig dat een fietser ook gebruik van de brug kan maken. Zoals te zien op de afbeelding 55 is de brug niet geschikt voor fietsers. Het grote nadeel van een kleine pijl is dat de horizontale reactiekracht op het landhoofd aanzienlijk groter wordt. Wanneer de pijl f dusdanig klein wordt zal het buigend moment groter worden en sprake zijn van een buigligger in plaats van een boog.

Een ander optie is om het dek met hangers aan de boog op te hangen of het dek op kolommen boven de boog te bevestigen, zie afbeelding 57. Op deze wijze kan toch volledig gebruik worden gemaakt van de boog. De boog kan zodanig worden gevormd dat de krachtenlijn zoveel mogelijk samenvalt met de as van de boog. Echter wordt de constructie wel een stuk complexer. De brug bestaat dan immers uit een boog, een rijdek en kolommen of hangers. Dit is in tegenspraak met een belangrijk uitgangspunt van het Raakproject dat de draagconstructie zo eenvoudig mogelijk moet zijn. De variant van de boogbrug is mede om deze reden niet nader onderzocht.



Afbeelding 57 Boogbrug, afbeelding links rijdek bevestigd onder de boog. Afbeelding rechts rijdek bevestigd op de boog

6 - 3.4 Buigligger

Veel bruggen zijn ontworpen als een op buiging belaste ligger, afbeelding 57. Deze ligger draagt de bovenbelasting, die loodrecht op de as van de ligger staat, af naar de landhoofden. De landhoofden moeten op hun beurt deze verticale boven belasting afdragen naar de ondergrond. Ten opzichte van de drie andere constructievarianten draagt het landhoofd in dat geval alleen een verticale belasting naar de ondergrond af.



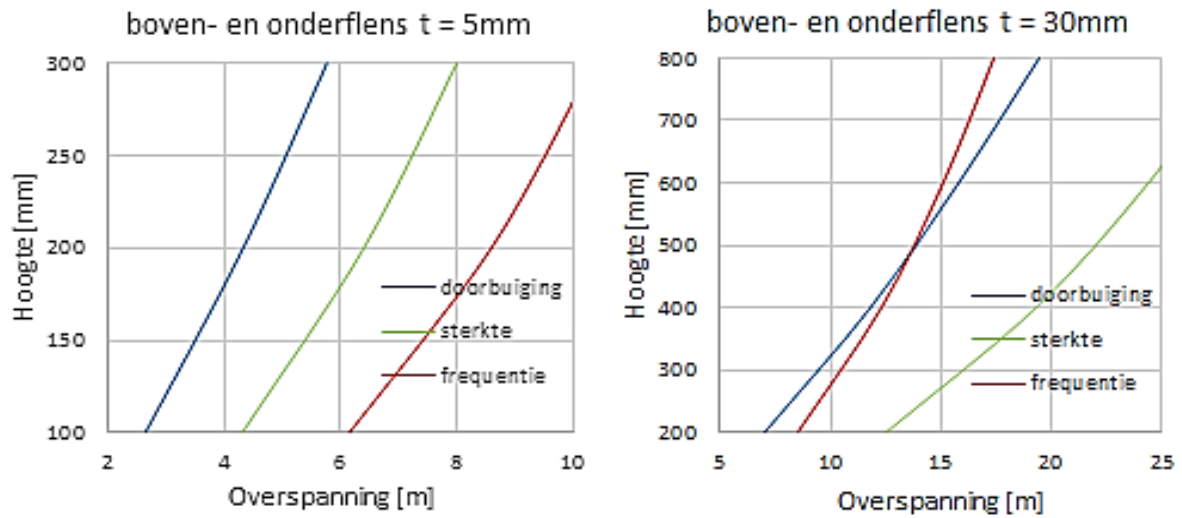
Afbeelding 58 Een op buiging belaste composietbrug
Fiets- en voetgangersbruggen in Purmerend gerealiseerd door Fibercore Europe en Haasnoot
Bruggen; Bron: www.fibercore-europe.com

Qua materiaal gebruik is een op buiging belaste ligger niet het meest efficiënt. Bij een op buiging belaste ligger wordt hoofdzakelijk het materiaal aan de buitenzijde, de onder- en bovenflens van het brugdek, aangesproken. Bij het ontwerpen van een brugdek die op buiging wordt belast kan in het algemeen worden gesteld dat één van de volgende drie toetsingen bepalend is voor de afmetingen:

1. Weerstand (sterkte) buigend moment (Uiterste grenstoestand)
2. Vervorming van het dek door fietsers en voetgangers (Bruikbaarheidsgrenstoestand)
3. Trilling² van het brugdek door fietsers en voetgangers (Bruikbaarheidsgrenstoestand)

Om inzicht te krijgen in de maatgevende toetsing zijn de drie boven genoemde controles onderzocht met een parameterstudie. In grafiek 13 zijn de resultaten weergegeven waarbij de toetsing net voldoet. In deze berekening is een vrij opgelegde ligger op twee steunpunten beschouwd. De overspanning en de hoogte van het brugdek zijn variabel. De dikte van de boven-, onder flens en de lamellen (dikte van 10 mm hart op hart 250 mm) zijn constant. In de berekening is een bovenbelasting van fietsers en voetgangers van 5 kN/m^2 aangehouden en een E-modulus van 20 GPa.

² Gesteld is dat de eerste eigenfrequentie groter moet zijn dan 5 Hz. In dat geval kan ervan uit worden gegaan dat het brugdek niet hinderlijke gaat trillen. Dit is een conservatieve benadering. Bij lager eigenfrequenties kan met uitgebreidere analyses worden aangetoond dat voldaan kan worden aan de gestelde comforteisen.



Grafiek 13 Resultaten toetsing brugdek

Uit de grafiek blijkt dat bij een kleine overspanning de doorbuiging maatgevend is en bij grotere overspanningen de eigen frequentie. Sterkte is geen maatgevende controle.

Uit deze studie is gebleken dat een brug uitgevoerd als een buigligger met de huidige kennis van bio-based composiet de meest haalbare variant is.

6 - 4 Uitwerking Bio-brug

Een bijdrage van Rijk Blok, Projectleider 4TU Lighthouse project B3 Bio-Based Bridge (Projectpartners: TU/e, TUD, CoEBBE (Avans en Hogeschool Zeeland) en NPSP bv.) in nauwe samenwerking met SIA Raak project bio-based brug



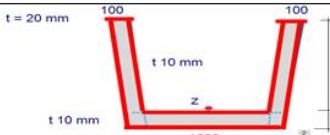
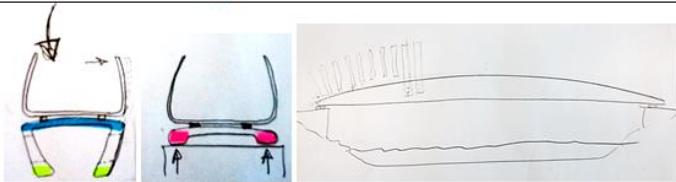
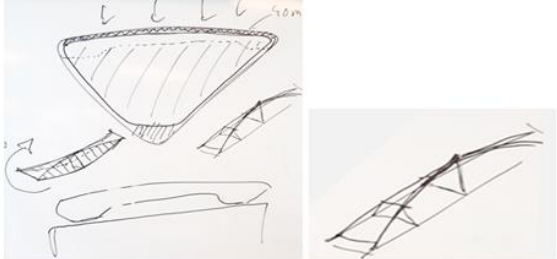
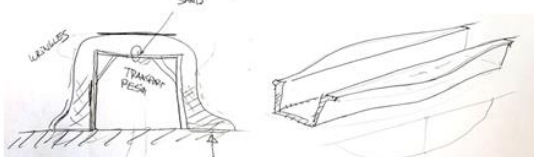
Afbeelding 59 Biocomposietbrug bij de opening in oktober 2016

De oorspronkelijke ambitie om een brug van ca. 8 m te maken werd gedurende het project opgerekt tot maar liefst 14 m, om zo de Dommel op de TU/e campus te kunnen overspannen. Via Dienst Vastgoed van de TU/e is een locatie gevonden bij een al bestaande stalen voetgangersbrug bij het auditorium naar het park aan de Kennedylaan. Zo kunnen de al aanwezige landhoofden gebruikt worden.

6 - 4.1 Ontwerp en uitwerking

De brug is volledig gemaakt van bio-based materialen: hennep- en vlasvezels in een bio-hars en rond een PLA (melkzuur) bio-schuim. Uiteraard moest de brug voldoende sterk en veilig worden, bovendien is een bouwvergunning door de gemeente Eindhoven noodzakelijk. Aanvankelijk werd gedacht dat het composiet materiaal zich stijver zou gedragen in trek dan in druk en dat ook de kruip onder trek minder zou zijn. Daarom is er in de ontwerpen naar

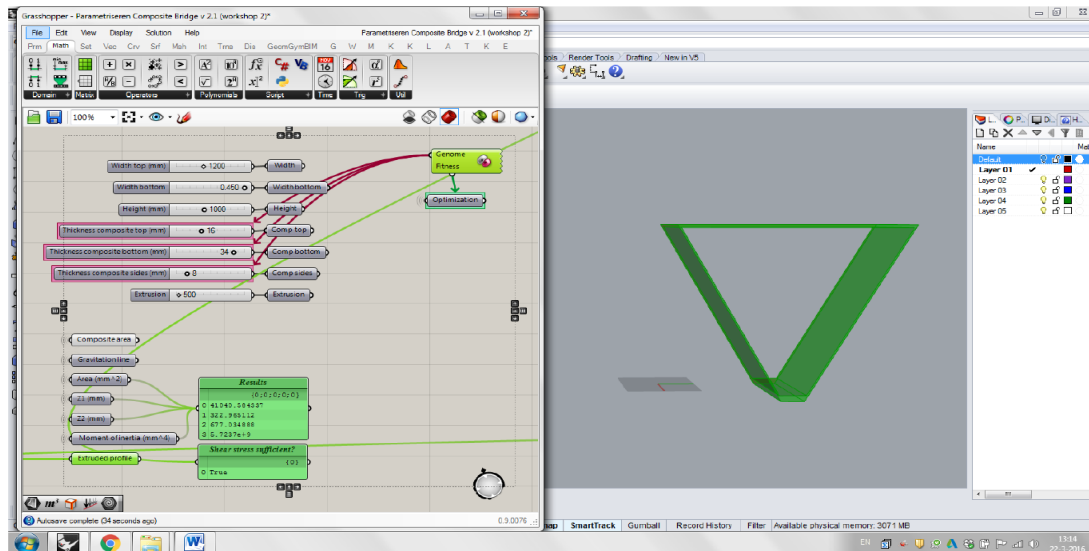
gestreefd om de maximale drukspanningen lager te houden dan de maximale trekspanningen. Dit resulteerde in een ontwerp waarbij het brugdek dienst deed als drukzonde en de trekzonde verloopt in hoogte. Daar waar het moment het grootst is (in het midden van de ligger) is de momentarm (hoogte) van het profiel het grootst. Het profiel verloopt daarmee van een rechthoekige doorsnede ca 1,2 m breed en 0,35 m hoog naar een driehoekige doorsnede van 1,2 m breed en 0,95 m hoog.

no.	Name	Section/ impression
	First dimensioning exercise	
1	Right Side Up- Side Down Bridge	
2	Tri-angle bridge (version of design above)	
3	Wing railing Bridge	

Afbeelding 60 Voorbeelden van tussentijdse voorlopige resultaten uit Ontwerp-workshops

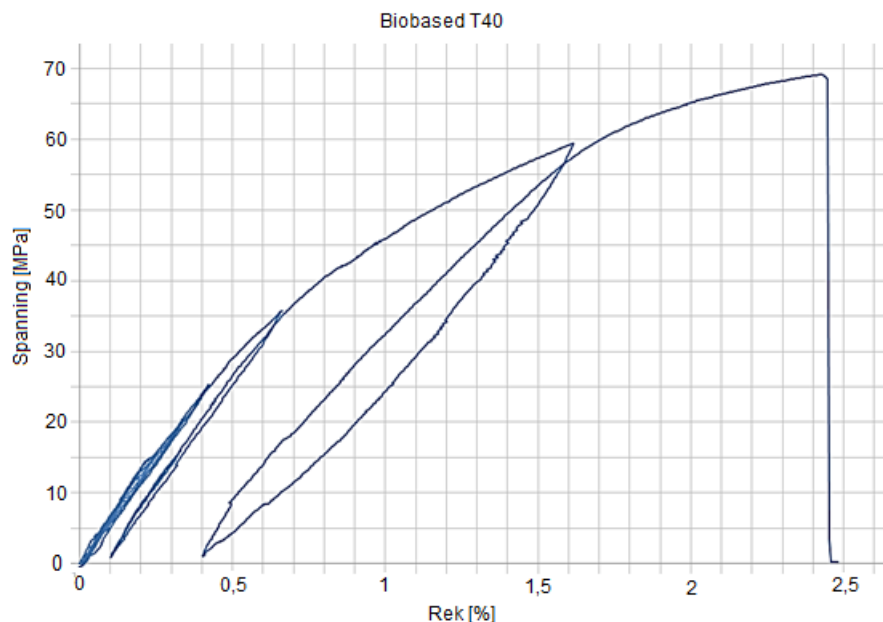
Begonnen werd met gezamenlijke ontwerp-workshops om ideeën te genereren, vervolgens werden meest kansrijke geachte ontwerpen verder uitgewerkt. In vervolgprojecten werden de ontwerpen geoptimaliseerd met o.a. Grasshopper/Rhino.

Rhinoceros (afgekort Rhino) is een 3D CAD tekenprogramma waarin allerlei applicaties kunnen draaien die het mogelijk maken om generatief met behulp van algoritmes te ontwerpen. Grasshopper is zo'n applicatie in Rhion, waarmee ontwerpregels kunnen worden geprogrammeerd. Zo wordt het genereren en optimaliseren van heel veel ontwerp-alternatieven mogelijk. Afbeelding 61 geeft een screenshot van het programma, waarbij links de rekenregels ingevoerd zijn. Verschillende parameters, zoals hoogte, breedte onder en boven, wanddiktes etc van het profiel kunnen zo snel aangepast worden waarbij direct resultaten zoals vorm, oppervlakte maar ook kwadratisch oppervlaktemoment geëvalueerd kan worden.



Afbeelding 61 Screenshot Grasshopper/ Rhino om door middel van parameters verschillende doorsneden te generen

Uiteraard werden materialen beproefd op sterkte en stijfheid om het materiaal gedrag zo nauwkeurig mogelijk te kunnen modeleren en om te komen tot veilige rekenwaarden van materiaalsterktes.



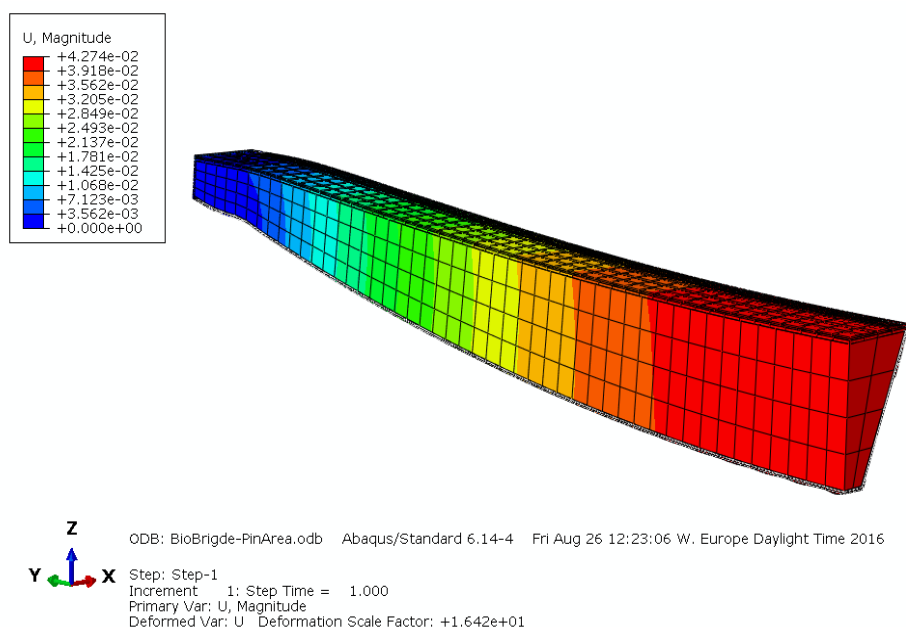
Afbeelding 62 Voorbeeld van een spannings-rek diagram als resultaat van een trek-test (woven flax)

De lussen in het spanningsrekdiagram geven aan op welk punt de belasting weer is afgenomen. Dit is gedaan om te zien of er blijvende vervormingen zouden optreden,

bijvoorbeeld door beginnende scheurvorming of bezwijken van vezels en op welk punt dit verschijnsel dan zou optreden. Bij herhaaldelijk belasten tot ca 25 MPa is te zien dat de het spanningsrekdiagram op vrijwel hetzelfde punt uitkomt. Ook is te zien dat er lussen ontstaan, Hysteresis. De oppervlakte onder een spanningsrekdiagram is een maat voor de verrichtte arbeid. Wanneer er deze lussen ontstaan is de oppervlak in de lus een maat voor de energie die in het materiaal zelf is opgenomen, bijvoorbeeld door interne visceuse wrijving. Dit is gunstig voor het dynamisch gedrag. Het materiaalgedrag zelf zorgt daarmee voor enige demping van trillingen.

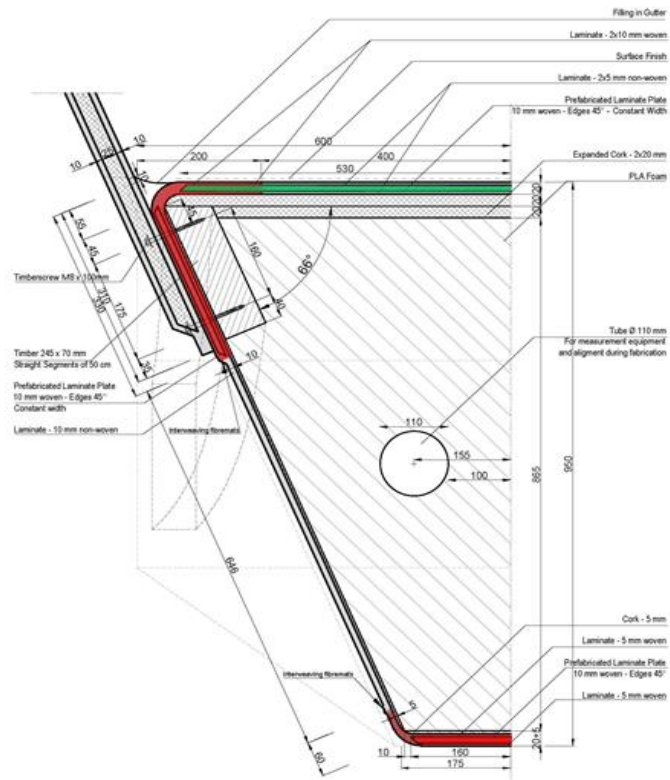
Om vanuit de gegevens uit materiaaltesten uiteindelijk te komen tot veilige rekenwaarden van materiaalsterktes is een benadering analoog met CUR aanbeveling 96 (Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies) gevolgd. Hoewel de aanbeveling hiervoor feitelijk niet van toepassing is en er bovendien nog onvoldoende onderzoek beschikbaar is, biedt de aanbeveling toch een leidraad voor vergelijking. Met een ondergrens en bovengrens benadering van de in de CUR 96 gehanteerde verschillende conversiefactoren en materiaal veiligheidsfactoren is er uiteindelijk een veiligheid van ca 3,8 toegepast op de karakteristieke waarden van alle proeven. De gecombineerde materiaalfactoren met alle invloeden van lange duur, vocht, spanningswisselingen, onzekerheid in productie etc. maakten dat de ontwerpwaarden van de sterktes op ca. 15 tot 20 MPa uitkwamen.

Met behulp van deze en aanvullende gegevens zijn de voorlopige ontwerpberekeningen gemaakt en naarmate er meer gegevens beschikbaar kwamen, de nauwkeurigere constructieve berekeningen (aanvankelijk met simple raamwerkprogramma's maar later ook met meer complexe eindige elementenprogramma (FEM) Abacus) gemaakt.



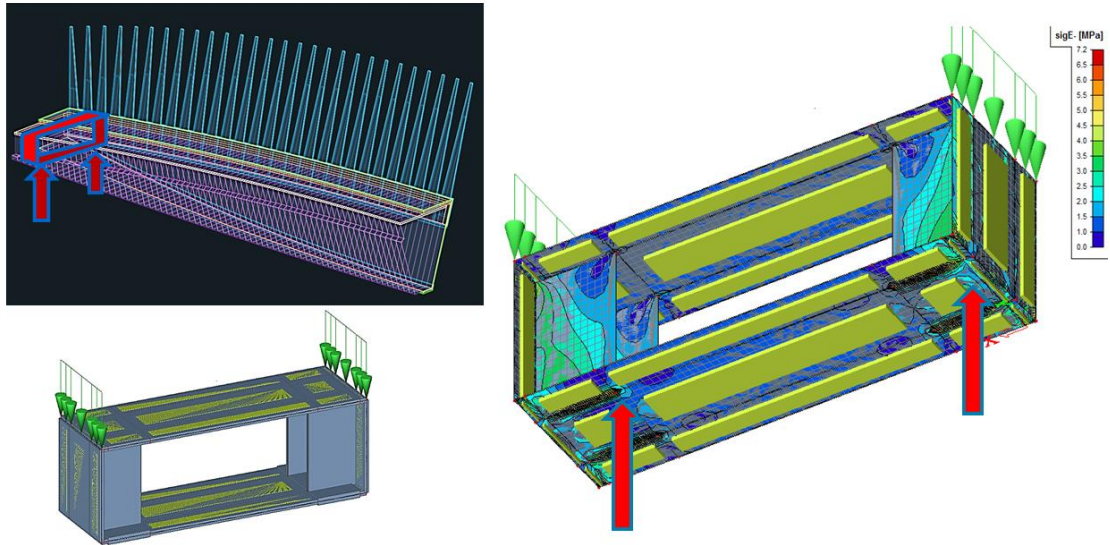
Afbeelding 63 Voorbeeld resultaat Abacus berekening verticale doorbuiging (1/4 vd brug is gemodelleerd uit symmetrie-overwegingen)

In dit abacusmodel zijn de verschillen in materiaal tussen het woven vlas en het non-woven hennep afzonderlijk gemodelleerd. De schuine zijkanten en ook delen van het brugdek zijn uitgevoerd in het (goedkopere) Non-Woven hennep, de meer constructief belangrijke delen zoals de hoeken bij het brugdek (Druk zijde) en de onderzijde (trekband) zijn uitgevoerd in het sterkere en stijvere Woven Vlas en voor een klein gedeelte ook in U-D (Uni-Directional) Vlas. Na de vaststelling van een haalbaar definitief ontwerp werden de detail- en productietekeningen gemaakt.



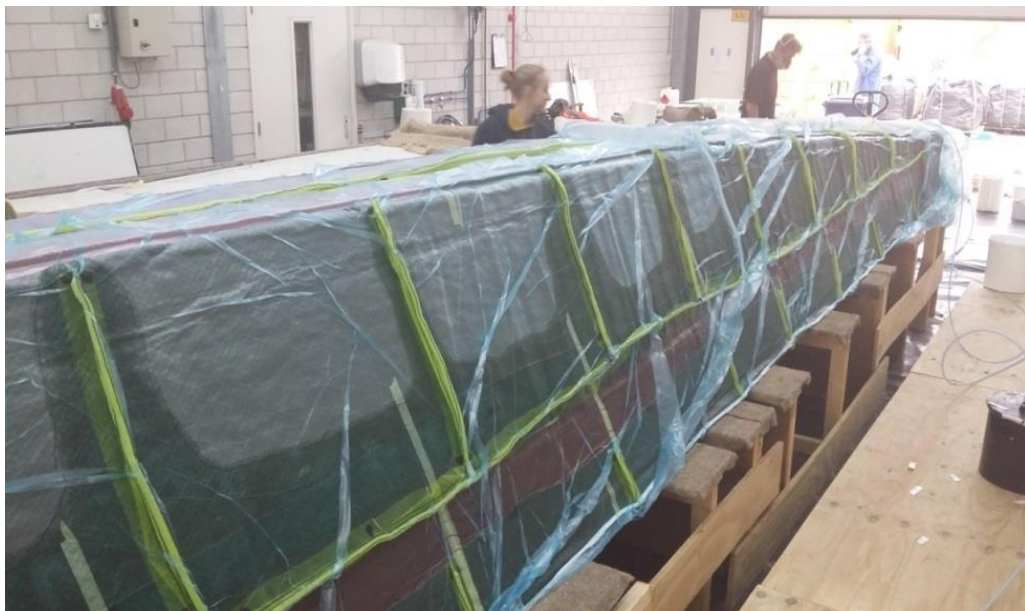
Afbeelding 64 Voorbeeld productietekening met in groen en rood aangegeven de prefab lamellen

Aparte aandacht kreeg de constructie ter plaatse van de oplegging. De momenten zijn hier vrijwel nul en de hoogte van het profiel is ter plaatse nog slechts 350 mm. Vanuit de opleggingen moeten hier de maximale oplegreacties de brug ingeleid kunnen worden. Uiteindelijk is er voor gekozen om hier ter plaatse verstijvingsschotten toe te passen om de belastingen naar de oplegpunten te leiden en plaatselijke plooi van de kokerwand te voorkomen.



Afbeelding 65 Principe van de brugoplegging met verstijvingsschotjes

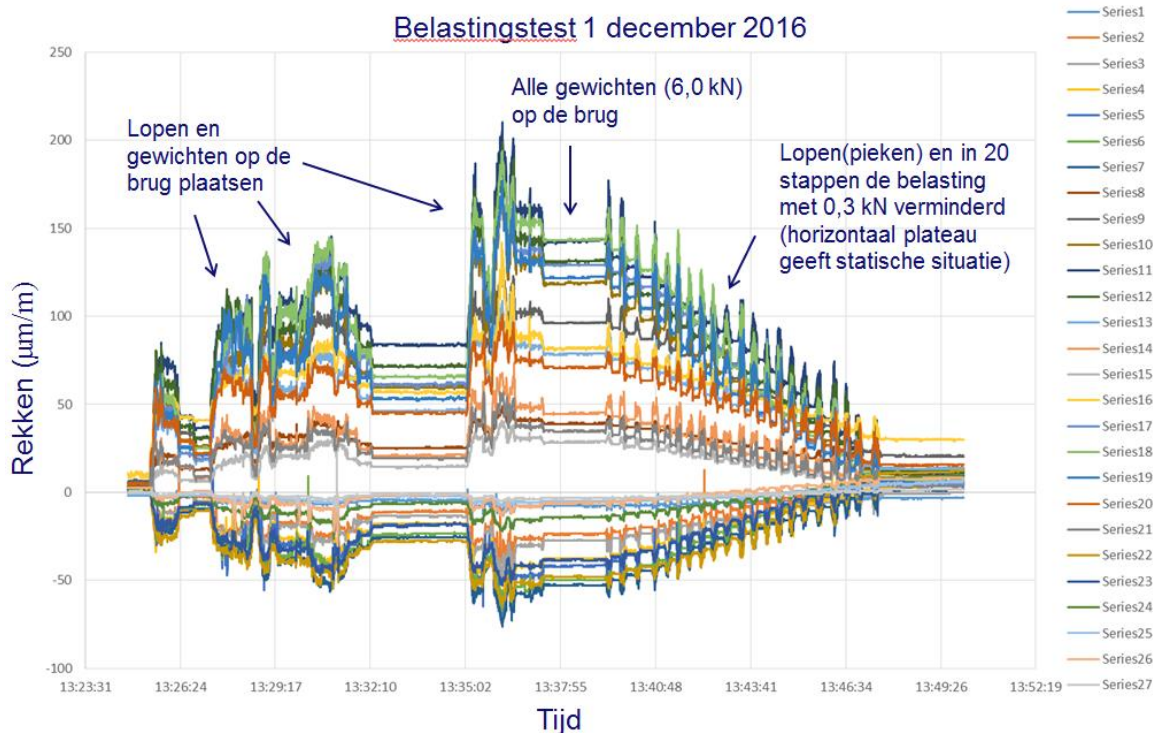
De gekozen productiemethode is vacuüm-infusie. Simpel gezegd betekent dit dat er een pakket vezels (glas en hennep) rond een vorm van bio-schuim geplakt werd, dit werd in een grote zak vacuüm gezogen waardoor er een vloeibare bio- (epoxy)hars het product in werd gezogen. De hars gaat een reactie aan met de daardoorheen gemengde verharder en hardt uit.



**Afbeelding 66 Brug ligger (op zijn kop) tijdens de harsinjectie.
De donkere delen zijn al met hars verzadigd**

Deze exotherme reactie veroorzaakte opwarming van de interne schuimkern. Ervaringen met eerdere testen en met een 2 m lang 1:1 productietestmodel leerden dat de temperaturen hierbij te hoog zouden gaan oplopen waardoor de schuimkern zou gaan smelten. Om deze reden werd er in de eigenlijke brug gewerkt met geprefabriceerde lamellen van 10 mm. Met deze lamellen in onder en boven flens is zo een kokervormige brugligger van een bio-composiet rond de bio- (PLA) schuimkern gemaakt. De kokerligger is slechts 10 mm dik ter plaatse van de zijwanden en in totaal 20 mm in de onder en bovenflens. Dit betekent dat de ligger in verhouding tot bijvoorbeeld een betonnen brug erg licht is.

Om de ligger ook gedurende zijn levensduur in de gaten te kunnen houden en het gedrag verder te kunnen volgen is de ligger in het composiet van de boven- en onderflens voorzien van glasvezelsensoren. In een uiterst dunne glasvezel zijn op regelmatige afstand (variërend van 1 tot 1,5 m hoh.) hologrammen ge-etst. De techniek heet Fibre Bragg Grating. Wanneer de sensor wordt opgerekt door bijvoorbeeld een belasting of een temperatuurs-verandering dan verschuift het lichtspectrum hierin. De verschuiving is een goede maat voor de rek waarbij een hoge nauwkeurigheid van 1 micrometer per meter gehaald kan worden. Met studenten wordt met deze techniek in de 28 sensoren de rekken gemeten. Inmiddels zijn de eerste belastingsproeven gedaan en zijn de eerste resultaten bekend. Er zullen nog aanvullende proeven gedaan worden waarbij o.a. het dynamisch gedrag (eigenfrequenties, trillingen en demping) gaan worden.



Afbeelding 67 Impressie van de resultaten van de (28) optische Fibre Brag sensoren bij een belastingtest van 6,0 kN (rek versus tijd)

Met studenten van de TU/e worden met deze techniek in de 28 sensoren de rekken gemeten. Inmiddels zijn de eerste belastingsproeven uitgevoerd. Afbeelding 67 laat de resultaten zien van een statische belastingsproef waarbij er 20 gewichten (die elk een belasting van 0,3 kN vertegenwoordigen) op het midden van de brug zijn geplaatst. De dynamische effecten van het op de brug lopen tijdens het plaatsen en weghalen van de gewichten zijn ook duidelijk zichtbaar in de pieken van de grafieken. Het vervormingsgedrag, kruip en temperatuurseffecten kunnen nu nauwkeurig worden gemonitord. Er worden verder nog aanvullende proeven gedaan waarbij o.a. het dynamisch gedrag (eigenfrequenties, trillingen en demping) beschouwd worden en het verloop van het gedrag in de tijd zal worden bijgehouden.

Het eerder genoemde testmodel en de definitieve brug zijn gefabriceerd in het Avans composietlaboratorium bij Spark in Rosmalen. De brug is daar volledig gemaakt met studenten van vier verschillende opleidingsniveaus: TU/e, TUD, Avans Hogeschool, het Koning Willem 1 college en de Bossche Vakschool. Uiteindelijk is met een Belastingproef op de brug zelf in de productiehal aangetoond in aanwezigheid van de inspecteurs van Bouwen en woningtoezicht van de Gemeente Eindhoven, dat de brug volledig sterk en veilig genoeg is.



Afbeelding 68 Tijdens de belastingtest werd uiteindelijk 500 kg per m² belasting (in water) op de brug gezet. Doorbuiging in de midden ten gevolge van deze belasting bedroeg uiteindelijk ca. 35 mm

Met de glassensor-technologie heeft de brug nu 28 meetpunten gekregen waarmee het verdere vervormings- en materiaalrekgedrag van de brug verder gevolgd zal worden.



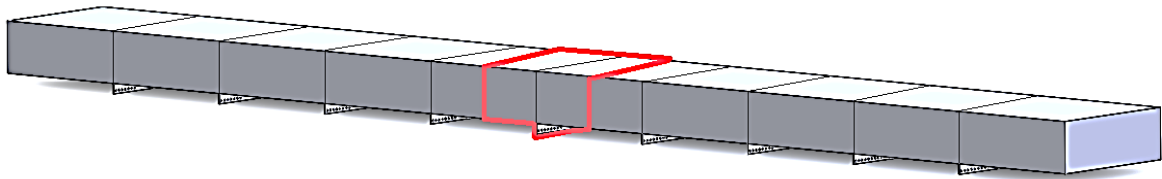
Afbeelding 69 *In Situ meten van de rekken in de glasvezels*

De brug is geplaatst in de Dutch Design Week 2016.

6 - 5 Modulair ontwerpen –

één stap verder richting de circulaire gedachte?

Wat betekent dit nu – circulair denken en doen – voor een concreet project zoals de Bio-based Brug? De ontkoppeling/demontage kan op diverse manieren onderzocht worden, op verschillende schaalniveaus en voor verschillende ontwerpvarianten.

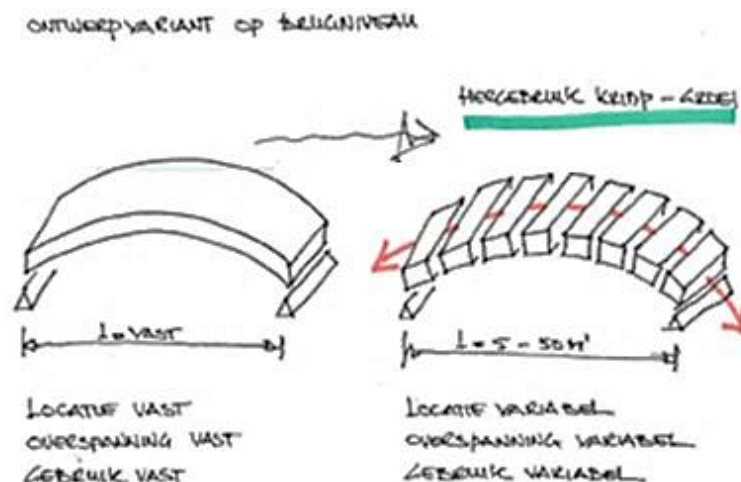


6 - 5.1 De modulaire ontwerpvarianten

Ontwerpvariant 1. Demontage van het gehele object

Bij een demontage van het hele object kan de brug helemaal worden verplaatst en vervolgens op een andere plek worden hergebruikt. Er zijn dan twee opties:

- of de brug is zodanig van lengte dat deze een op een op de andere locatie kan worden gebruikt of
- de andere locatie vereist een *kortere of langere brug in overspanning*. In dat laatste geval moet de brug zo ontworpen zijn dat deze in delen kan worden verlengd of ingekort (zie afbeelding 70).



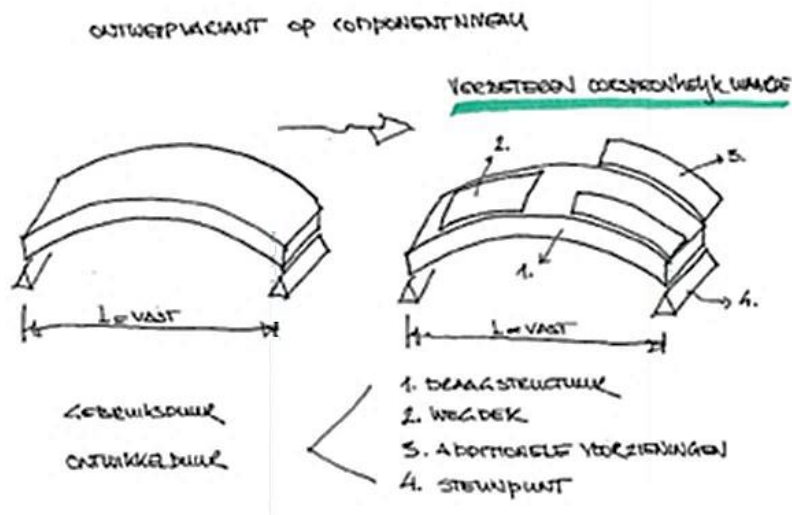
Afbeelding 70 Demontage van het gehele object [1]

Ontwerpvariant 2. Demontage van componenten

Bij een demontage van componenten kunnen deze worden hergebruikt of ontmanteld. De brug moet nu zo ontworpen zijn dat de verschillende componenten waaruit de brug is opgebouwd, kunnen worden ontkoppeld. Deze componenten zijn globaal te benoemen als

- landhoofd
- overgangsconstructie (stootplaten)
- brugdek
- wegdek
- additionele voorzieningen (verlichting, leuning etc.)

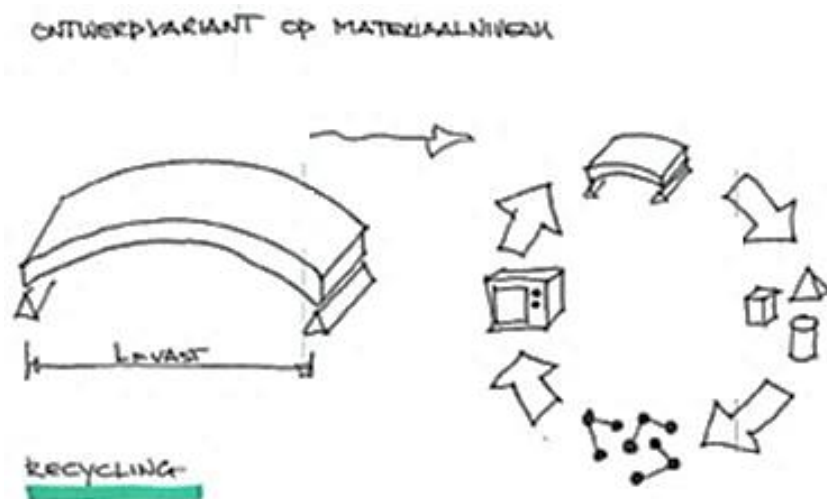
Deze optie tot ontkoppeling biedt de mogelijkheid tot hergebruik van componenten als, indien 100% te ontkoppelen, volledige recycling en hergebruik van het materiaal (zie afbeelding 71).



Afbeelding 71 Demontage van componenten [1]

Ontwerpvariant 3. Demontage van materialen.

Bij demontage van materialen moeten alle materialen waaruit de brug is samengesteld voor 100% te recyclen zijn. In het geval van bio-based composieten zou de hars van de vezel te scheiden moeten zijn waardoor aansluitend alle componenten afzonderlijk gerecycled zouden kunnen worden of het totale bio-based composiet is als zodanig te recyclen (zie afbeelding 72).



Afbeelding 72 Demontage van materialen [1]

Door deze werkwijze worden er mogelijkheden georganiseerd om gedurende de gebruiks- en/of levensduur van de brug, deze steeds te optimaliseren in gebruik, hergebruik of recycling van componenten. Datgene wat hiervoor nodig is *de verbinding*. Voor ontwerpvariant 1 is dit het ontwikkelen van de fysieke verbinding tussen brugdek en landhoofd en de verbinding tussen de elementen om het brugdek te verkorten of te verlengen. Als optimalisatie kan worden overwogen om het landhoofd te integreren in het volledige brugdek of een element van het brugdek.

Voor ontwerpvariant 3 geldt dat de verbinding op materiaalniveau zodanig moet zijn dat deze zonder vervuiling leidt tot afzonderlijke materialen die te recyclen zijn [1]. Op dit moment staat de ontwikkeling van het ontleden in materialen of moleculen chemisch of anders, behalve door verbranding, nog in de kinderschoenen (zie paragraaf 1-5.2).

Bij ontwerpvariant 2 is het noodzakelijk alle verbindingen tussen de componenten zodanig te ontwerpen dat deze tot ontkoppeling van deze componenten leiden, zodanig dat hergebruik of recycling mogelijk is. Uiteraard moeten de verbindingen tevens de constructieve belasting kunnen weerstaan. In het volgende hoofdstuk wordt een poging gedaan om in segmenten te denken, deze te ontwerpen, te produceren en te testen.

6 - 5.2 Ontwerpen van segmenten en de verbinding daarvan

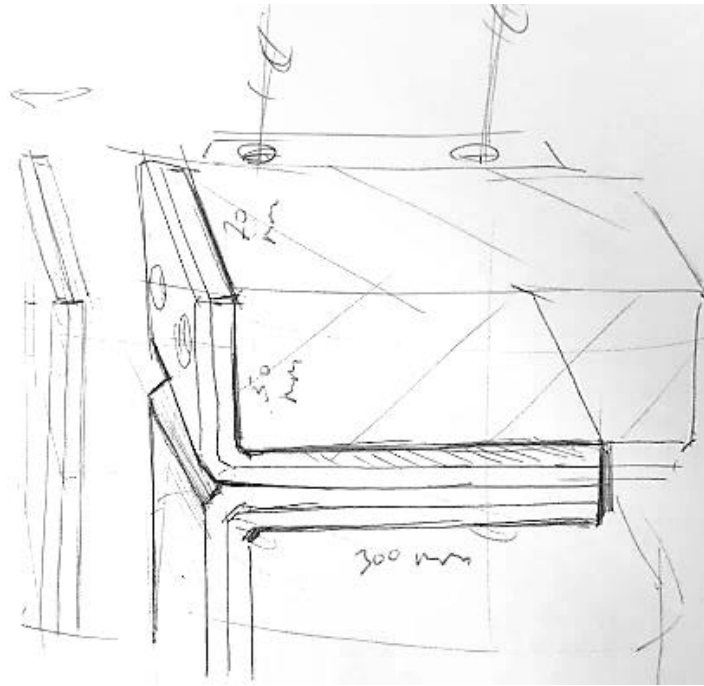
Welke vorm moet een segment hebben en hoe kan het verbonden worden aan andere segmenten of het landhoofd? Voor het verkrijgen van een overzicht van alle mogelijkheden is een morfologische kaart samengesteld, afbeelding 73. Wat moet er verbonden worden op welke plek en wat zijn de bijbehorende parameters daarvoor? De volgende subfuncties zijn hiervoor van toepassing: Verbinding, vorm, brugdek, kern, versterking, locatie, verbindingsmethode en bevestigingsmiddel.

Sub functies	Optie 1	Optie 2	Optie 3	Optie 4	Optie 5	Optie 6	Optie 7	Optie 8	Optie 9	Optie 10	Optie 11
Verbinding 	Segmenten 	Leuning 	y-model 	Landhoofd 	Oplegging 	Tussensteunpunt 	Hockstaal 	Verankering 			
Vorm 	Trapezium 	Opligger 	Driehoek 	Recht hoek/plank 	Plaat 	Buis/paal 	Balk 	Boog 			
Brugdek 	Composiet 	Bio composiet 	Hout 	kunststof 	Asfalt 						
Kern 	(PLA) Schuim 	Honingraat 	Balsa hout 	Ceder hout 	kurk 	Composiet 	Bio composiet 	Staal 	beton 		
Versterking 	Malgaten weels 	Geweven 	100% directionaal 	3D geweven 	Staal 	Aluminium 	2-pinning 				
Locatie 	Voorwand / achterwand 	Bovenkant 	Zijkanten 	Erin / hoek 	Erin / hoek 	Erin / hoek 	Erin / hoek 	Erin / hoek 	Erin / hoek 		
Methodiek 	Lijnen 	Pluggen 	Melamineren 	Naaien 	Witte verplek- wede klinknagel 	Voorspanning 	Beizen 	Lugs (ten gte vst) 	Geometrisch/ mechanisch 	Hockstaal/Waam 	platen
Bevestigings- middel 	Klinknagels 	Schroeven 	Moeren 	Bevesten 	Sluieringen 						

Afbeelding 73 Morfologische kaart met mogelijke verbindingen van brugsegmenten [109]

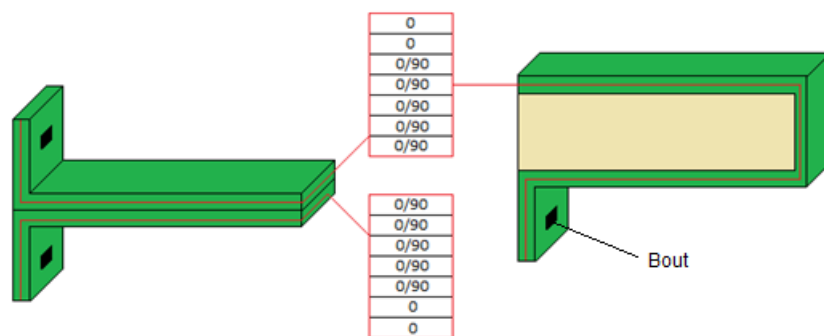
Alle mogelijke opties zijn per subfunctie opgenomen in de rijen. Vervolgens wordt er per subfunctie gekeken welke optie op dit moment het meest haalbaar is. Parameters hiervoor zijn maakbaarheid, materialen en voorkennis. Omdat verbindingen van constructief belastbare composiet segmenten nog niet breed onderzocht zijn is er voor de meest eenvoudige vorm gekozen.

In de eerdere uitwerking van brugmodellen kwam de buigligger als beste oplossing naar voren. Als de buigligger in segmenten opgedeeld wordt ontstaan rechthoekige segmenten, zie afbeelding 74.



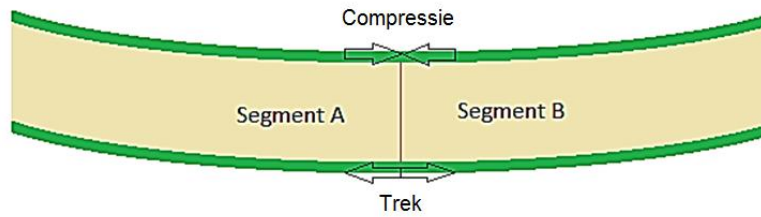
**Afbeelding 74 Mogelijke verbinding segment;
Tekening Didier Dorival, Inholland Composieten**

Deze segmenten, bestaande uit een sandwich van vlas/greenpoxy laminaat en een PLA kern, zijn aan elkaar verbonden doormiddel van meegelamineerde flenzen, bouten en moeren.



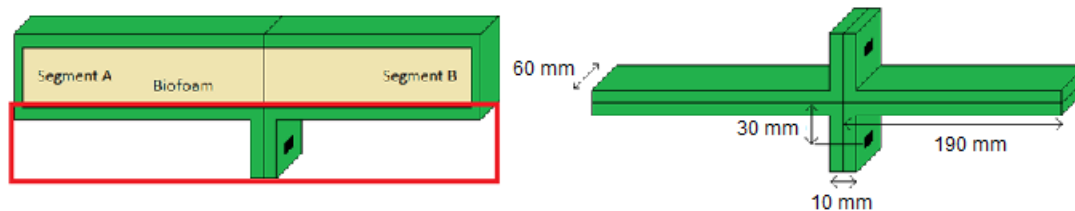
Afbeelding 75 Opbouw laminaat van treksample en sandwich

Een flens aan de onderkant is voldoende omdat de segmenten door de compressie tegen elkaar gedrukt worden.



Afbeelding 76 Compressie en trek van twee segmenten die tegen elkaar worden gedrukt

De afstand van de bouten (zwarte rechthoekjes in flensen) door de flens tot het brugsegment is op 30 mm gesteld omdat de treksterkte van een T-laminaat, verbonden op 30 mm ten opzichte van een verbinding op 70 mm afstand 50% hoger ligt, 100 MPa, respectievelijk 152 MPa [110].



Afbeelding 77 Schets T-Laminaat verbonden met bouten door flensen en trektest van sandwich segment, verbonden met de flens

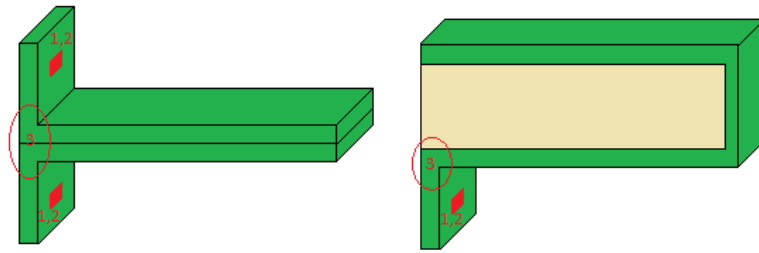
6 - 5.3 Is de verbinding sterk genoeg?

In hoofdstuk 5 – 4 werden de statische eigenschappen van het vlas/greenpoxy composiet beschreven. De treksterkte van een laminaat is ca 150 MPa. Een door middel van bouten verbonden laminaat is even sterk [110]. Maar zou ook een verbinding van twee sandwich segmenten sterk genoeg zijn?

Er zijn drie faalmodi geïdentificeerd:

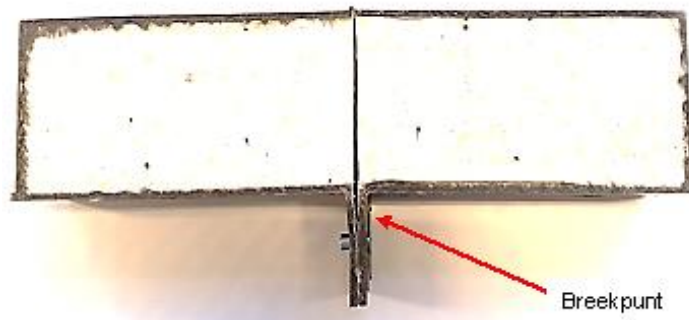
- vallen van de bighead
- 'pull-out' faalmodus bighead
- breken door buiging

De locaties van deze faalmodi zijn in afbeelding 78 geschetst. Aan de hand van een loadcase wordt de eigenschap van de verbinding vergeleken met een theoretisch stuk brug van dezelfde dimensies als twee gekoppelde segmenten.



Afbeelding 78 Verwachte faalmodi

De load case is een verdeelde belasting van 5 kN/m^2 . Dat betekent dat de brug een kracht van 5000 N per vierkante meter moet kunnen houden. Het maximale buigmoment voor een verdeelde belasting is $1/8 \omega L^2$. Als de brug 1000 mm breed is, dan wordt de load case 5000 N/m (in lengte). De breedte van de prototypes is 60 mm . In dit geval wordt de verdeelde belasting van de load case 300 N/m . De lengte tussen de steunpunten is 355 mm .

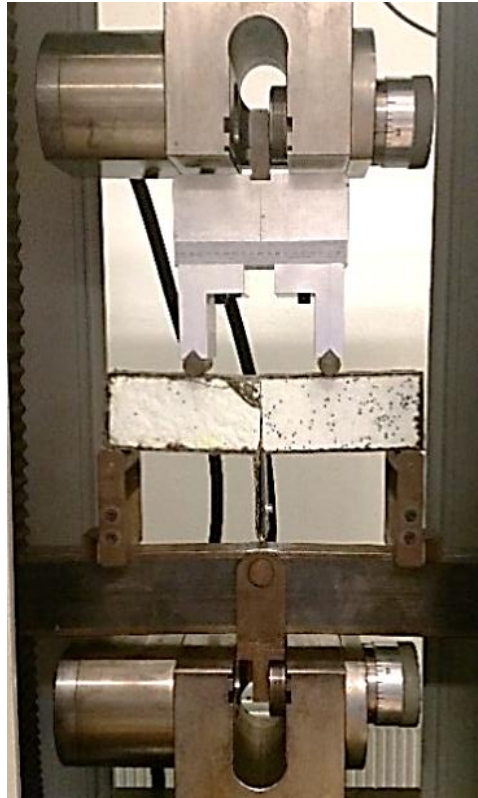


Afbeelding 79 Sandwich verbonden via bouten door flens

De maximale buigmoment aan de hand van de load case wordt dus:

$$M_{\max \text{ brug}} = \frac{\omega l^2}{8} = \frac{300 \cdot 0,355^2}{8} = 4,73 \text{ Nm}$$

De prototypes moeten deze buigmoment aankunnen. De sterkte van de prototypes zijn bepaald met een vierpuntsbuigproef. Het maximale buigmoment voor de test samples wordt berekend door de maximale kracht door twee te delen en te vermenigvuldigen met de afstand.



Afbeelding 80 Test opstelling vierpuntsbuigproef

Om de bepalen of de prototype de maximale kracht van de load case kan dragen, moet het maximale buigmoment (verkregen uit de tests) gelijkgesteld worden aan de theoretische waarde van de loadcase:

$$M_{max}testbank = M_{max}brug = 4,73 \text{ Nm}$$

$$M_{max}testbank = P \cdot a$$

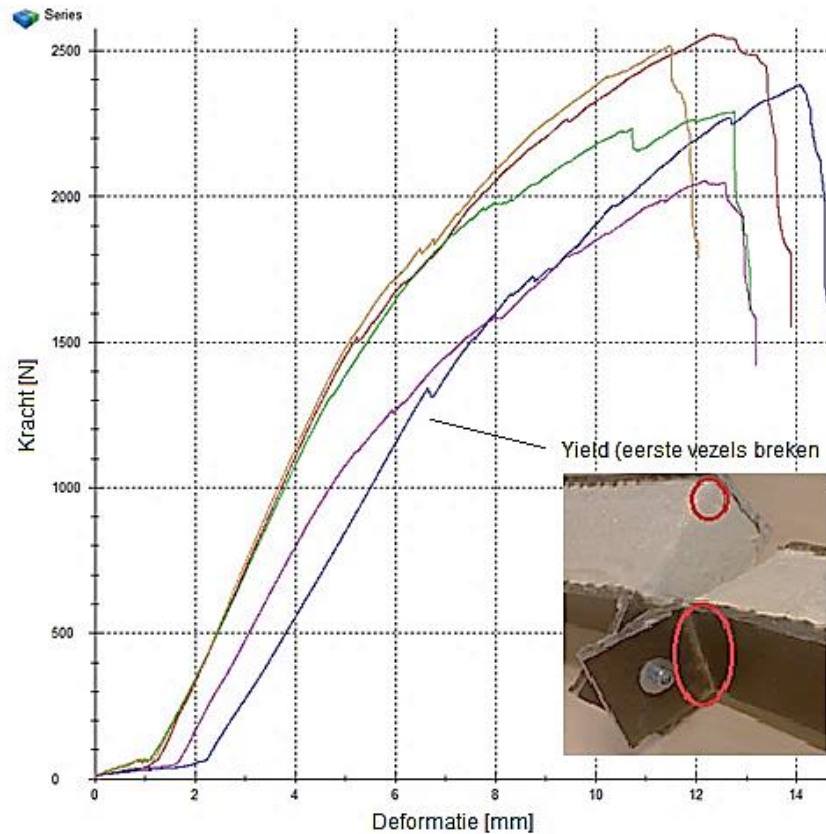
De afstand tussen de kracht en uiteinde in de testbank is 88,75 mm. De formule wordt:

$$4,73 = P \cdot 0,089$$

$$P = \frac{4,73}{0,089} = 53,1 \text{ N}$$

Deze waarde moet vermenigvuldigt worden met 2, omdat de testbank de totale kracht aangeeft (2 x P). Dit betekent dat de prototypes een kracht van 106 N moet aankunnen.

Vijf samples zijn conform ASTM 7250 (Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness) uitgevoerd. De kracht waaronder de eerste vezels bij de connectiefles breken is ongeveer 1200 N, zie grafiek 14.

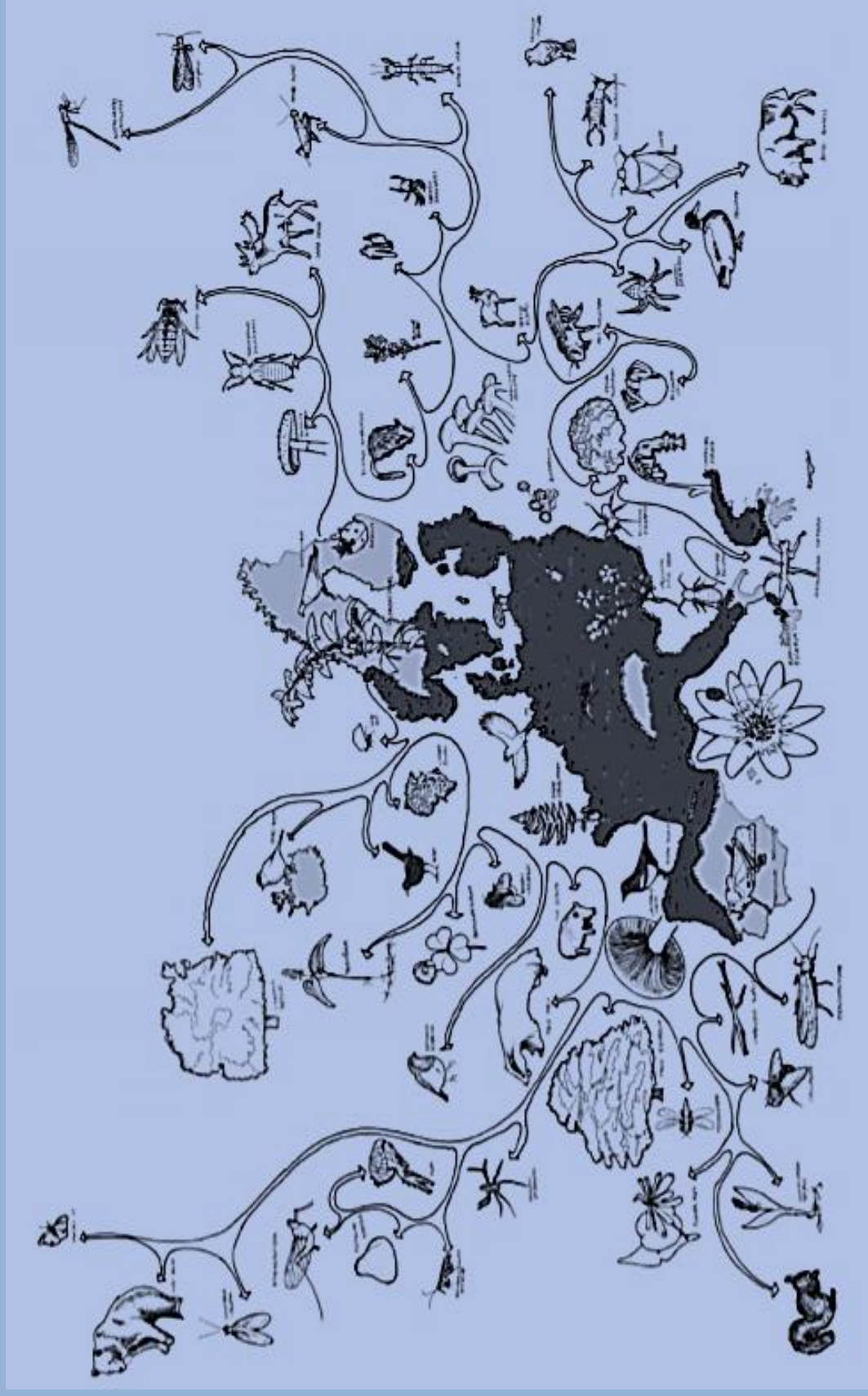


Grafiek 14 Vierpuntsbuigproef; bij ca 1200 N treedt de eerste faalmodus op

1200 N is met een factor 10 hoger dan de vereiste 106N. Daarmee is duidelijk dat het verbinden van brugsegmenten een weg is die genomen kan worden.

Modules hebben het voordeel dat zij gemakkelijk uit de constructie gehaald kunnen worden ten behoeve van reparatie of om ze bijvoorbeeld elders weer te kunnen gebruiken. Daarmee is het modulaire ontwerp van brugsegmenten aan elkaar gekoppeld een eerste stap in de richting van de circulaire gedachte.

Milieu impact van een Europese eik; getekend door Ro Koster en Ad Kil



Hoofdstuk 7

Terug – en Vooruitblik

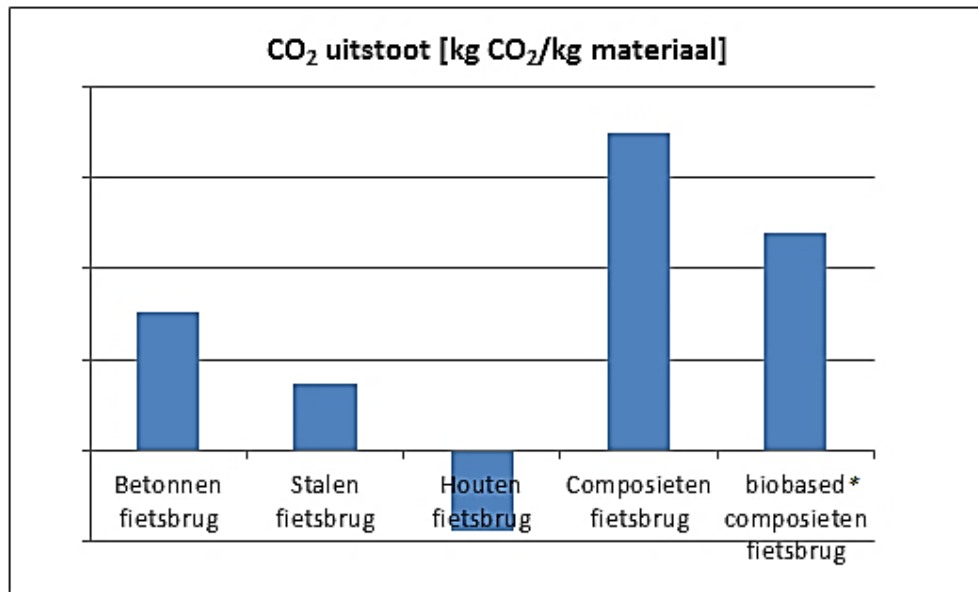
Refereren aan LCA studies is net als lopen in een mijnenveld. Voor alle verschillende toepassingen wordt materiaal op een bepaalde manier bewerkt, getransporteerd, enz. Daardoor wordt de milieu impact telkens anders. Het lijkt onmogelijk om het milieu impact van verschillende materialen vanuit verschillende bronnen met elkaar te vergelijken. Desalniettemin wordt in deze terugblik een wandeling door het mijnenveld ondernomen.

7 - 1 Een zaak van vertrouwen

Met het gebruik van bio-based bouwstenen voor composieten proberen we om de CO₂ impact te minimaliseren. Minimaliseren veronderstelt dat de impact van standaard composieten negatief is. Vanuit het perspectief van materiaalgebruik begrepen duurzaamheid is dat ook zo (composieten vereisen veel energie bij productie en zijn deels gebaseerd op aardolie). Om dat te veranderen wordt er gevraagd om de negatieve impact te minimaliseren zodat er een positieve impact uit ontstaat. Deze benadering leidt, zoals gezien in de voorliggende studie over de biobrug, nog niet voldoende tot het gewenste duurzame resultaat. Want?

Tabel 18 CO₂ impact van verschillende materialen

kg CO ₂ /kg materiaal	Vlas [111]	Hennep [111]	Miscanthus [111] [112]	Glas [113]	BioEpoxy [114]
CO ₂ opname	-1,39	-1,39	-1,58		-1,1
CO ₂ emissie	0,78	0,84 kunstmest 0,68 organisch	0,017	4,3	4,1
Totaal CO₂ footprint	-0,58	-1,29	-2,67 (0,15 van miscanthus beton)	4,3	3



Grafiek 15 CO₂ uitstoot van verschillende brugconstructies

*) *geschat door de CO₂ footprint van vlas en bio-based resin, grafiek samengesteld naar [115] [116]*

Grafiek 15 laat een vergelijkende studie uit 2013 zien waarin ook de geschatte waarde voor biocomposiet is opgenomen. Deze benadering volgt uit de impact van bio-polymeer ten opzichte van standaard polymeer in combinatie met vlas in plaats van glas.

Er zijn ook studies die precies het tegenovergestelde resultaat presenteren. In het (eerdere) onderzoek van 2009 is een doorgerekend brugontwerp in composiet vergeleken met in beton en staal uitgevoerde bruggen op basis van algemene brondata en ontwerpen. Composiet kwam destijds uit die studie als het meest gunstig naar voren. Dit onderzoek was echter uitgevoerd zonder betrokkenheid van de overige sectoren en op basis van generieke ontwerpen en data. In de studie is tevens uitgegaan van een tweede leven op een andere locatie voor de composietbrug. Dat scheelt wel bijna de helft in milieu-impact [117].

Er moet omgedacht worden. Wat kunnen we van de natuur leren? Zijn dieren of planten bezig om hun negatieve impact te minimaliseren? Nee, natuurlijk. Er zijn geen dieren of planten met een negatieve impact, tenminste zien we dat niet zo. Bijvoorbeeld de eik: De eik zorgt goed voor zichzelf. Hij neemt net zoveel plaats in als hij nodig heeft, gebruikt al het zonlicht wat hij krijgen kan en absorbeert alles aan water en nutriënten van de grond en transporteert dit tot de puntjes van zijn takken om zo hoog en breed mogelijk te kunnen groeien. Maar gedurende dit proces coöperiert de eik met luizen die zijn blaadjes eten, met mycorrhiza die nutriënten uit de bodem extraheren. De eik produceert ca 100.000 eikels elk jaar die door wilde zwijnen, Vlaamse gaaien, eekhoorntjes en talloze andere diersoorten gegeten worden. De eik geeft ruimte voor vogelnesten en insectenhuisen, hij verrijkt de bodem met bladeren, enz. Al met al zorgt de eik voor 1300 andere species en hij reinigt bovendien het water en de lucht, geeft schaduw en produceert zuurstof. Wat een eik. Door alle samenwerkingen voegt de eik waarde toe aan het systeem en verandert de impact in een zo positief mogelijk.

De eik is een voorbeeld voor echte duurzaamheid, waar waarde aan het systeem wordt toegevoegd en met een positieve impact voor zichzelf maar ook voor anderen. In het geval van de eik is er sprake van een ecologische footprint. Hoe groter hoe beter. In het geval van onze samenleving praten we niet alleen over de ecologische footprint maar ook over een culturele footprint, sociale en economische footprint. Waar pure techniek niet de impact oplevert die nodig zou zijn om waarde toe te voegen moeten we omdenken en de toegevoegde waarde in andere aspecten van het voorliggende probleem zoeken. Dan kunnen we ontwerpen met een grote toegevoegde waarde en waarschijnlijk veroveren een dergelijk ontwerp een unieke positie op de markt [2].

Omdenken is dus noodzakelijk. Of grondstoffen en producten worden vanuit het oogpunt van hergebruikt of verder gebruik ontworpen of grondstoffen moeten vanuit een volledig groen productieproces verkregen worden of er moet helemaal out-of-the-box gedacht worden.

7 - 1.1 **Echt circulair**

Een toepassing van composieten gebaseerd op natuurlijke vezels en matrixpolymeren van hernieuwbare grondstoffen in structureel belastbare constructies levert op dit moment nog niet de gewenste toegevoegde maatschappelijke waarde en positieve milieu impact op. In een optimale situatie maakt de circulaire economie deel uit van een duurzame samenleving. Hierin zal anders worden gekeken naar producten. De focus zal enerzijds liggen op het reduceren van de ecologische footprint. Anderzijds zal deze liggen op gebruik in plaats van bezit en daardoor zullen businessmodellen ook veranderen van product gebaseerd naar meer diensten gebaseerd. Tenslotte zal dit ook gevolgen hebben voor de sociaal-maatschappelijke verhoudingen die veelal gefundeerd zijn op of beïnvloed worden door productbezit, lineaire ketens en fossiele bronnen. Een re-design van zowel producten als van de samenleving is daarmee onontkoombaar.

De bio-based bank (www.biobasedsofa.nl) (zie ook het filmpje <http://sofa.innoventuri.com/media/>) voldoet aan het criterium up-cycling door verhoogde milieu impact omdat de materialen, eigenlijk bestemd voor het weren van ganzen aan het einde van hun 'bruikbaar leven' als weermiddel worden verwerkt tot een voorwerp dat door de maatschappij gebruikt kan worden.

Literatuur

- [1] E. Quanjel, „'De Verbinding' en het organiseren van de verandering,” in *Lectorale rede lector innovatie bouwproces & techniek*, Den Bosch, Hogeschool Avans, expertisecentrum duurzame innovatie / academie bouw & infra, 2014.
- [2] R. Koster en A. Kil, „Enlarge your positive ecological footprint,” in *Dynamics of theory and practice*, Tjechie, Sisu-line, pp. 15-22.
- [3] A. Lansink, „Ad Lansink's website,” 2014. [Online]. Available: http://www.adlansink.nl/?page_id=2. [Geopend september 2015].
- [4] K. Van Beurden, G. Brinks, H. Van Leeuwen, M. Scheffer, P. Griffioen, B. Meijer, W. Teeuw en T. Huibers, „Milieubewuste kunststoffen: biopolymeren...van plan(t) tot product in het kader van RAAK: Materialen in ontwerp2,” Saxion Kenniscentrum Design en Technologie, Enschede, 2010.
- [5] R. Narayan, „Fundamental principles and concepts of Biodegradability,” *Bioplastics magazine*, vol. 4, nr. 1, 2009.
- [6] Biobasedeconomy, „wat is biobased economy,” 2016. [Online]. Available: <http://www.biobasedeconomy.nl/war-is-biobased-economy/themas/biomassa>.
- [7] R. Narayan, „Biobased & Biodegradable Polymer materials: rationale, drivers and technology exemplars,” in *American Chemical Society, Division of Polymer Chemistry meeting*, San Diego, 2005.
- [8] M. Barth en M. Carus, „Carbon Footprint and Sustainability of different natural fibers for composites and insulation material,” Nova Institute, Huerth, (D), 2013.
- [9] P. Bosman en Lectoraat kunststof Technologie, *Bio-based brug Emmen*, Stenden & Windesheim: Green Pac Polymer Application Centre.
- [10] E. Zini en M. Scandola, „Green Composites: An Overview,” *Polymer Composites*, pp. 1905-1915, 2011.
- [11] P. Fowler, J. Hughes en R. M. Elias, „Review Biocomposites: technology, environmental: credentials and market forces,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 86, pp. 1781-1789, 2006.

- [12] R. Nijssen, *Basiskennis Composieten*, Alkmaar: Hogeschool InHolland, 2015.
- [13] Sirris, „Technical series part 1 – introduction. EU Pluscomposites project.,” 2012.
- [14] Thomason, *The ReCoVer project : Regenerating the performance and the recovery of Glass fibre*, 2016.
- [15] FNR, „Basisdaten biobasierte Produkte, Oktober 2014,” 2014.
- [16] Sirris, „White paper - Recyclage van composieten,” 2016.
- [17] waterrecreatieadvies, „Aantal ‘end of life’ boten in Nederland,” Waterrecreatie Advies BV, 2015.
- [18] Pastine en et al, „NOVEL AGENTS FOR REWORKABLE EPOXY RESINS patent application A1”. Patent WO/2012/071896, 2012.
- [19] E. Keijzers, J. Van Dam en G. Yilmaz, „Cellulose, een eindeloze bron van mogelijkheden,” Wageningen UR Food & Biobased Research, Wageningen, 2011.
- [20] M. Carus, S. Karst, A. Kauffmann, J. Hobson en S. Bertucelli, „The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds,” European Industrial Hemp Association, Huerth, 2013.
- [21] M. Carus, D. Vogt en T. Breuer, „Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaserwerkstoffen (Deutschland und EU),” Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., nova-Institut GmbH, Gülzow, 2008.
- [22] M. Carus, „Naturfaserverstärkte Kunststoffe,” Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., nova-Institut GmbH, Gülzow, 2008.
- [23] S. van de Groot, M. de Groot, E. Janssen, E. Kok en S. Niekolaas, „Dartbordvezel onder de loep,” *IDE442 Materialeseren, technische Universiteit Delft, Faculteit Industrieel Ontwerpen*, 2002.
- [24] A. Werkgroep, „Vlas,” 2012. [Online]. Available: <http://www.awn-beverwijk-heemskerk.nl/pdf/bewerkingvlas.pdf>.
- [25] I. Van de Weyenberg, *Thesis: Fax fibres as a reinforcement for epoxy composites*, Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2005.
- [26] „<http://hempflax.com/wat-is-hennep/hennep-productie>,” [Online].
- [27] „<http://www.vandebiltzadenvlas.com>,” [Online].
- [28] „<http://www.vlasmuseum.nl/van-vlas-tot-linnen>,” [Online].
- [29] Texperium, Interviewee, *In het kader van het 'new foss project'*. [Interview]. mei 2016.
- [30] K. Charlet, C. Baley, C. Morvan, J. Jernot, m. Gomina en J. Bréard, „characteristics of Hermes flax fibers as a function of their location in the stem,” *Composites Part A Applied*

science, vol. 38 (8), pp. 1912-1921, 2007.

- [31] M. John en S. Thomas, „Biofibres and biocomposites,” *Carbohydrate Polymers* (71), pp. 343-364, 2008.
- [32] Z. Azwa, B. Yousif, A. Manalo en W. Karunasena, „A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres,” *Materials and Design*, vol. 47, pp. 424-442, 2013.
- [33] M. Symington, W. Banks en O. West, „Tensile Testing of Cellulose Based Natural Fibers for Structural Composite Applications,” *Composite Materials*, vol. 43, nr. 9, pp. 1083-1108, 2009.
- [34] V. Innovatienetwerk, „Eindverslag IWT TETRA project 100147 "toegevoegde waarde van lignocellulose bio-cracking voor biogebaseerde materialen,” 2012. [Online]. Available: www.innovatienetwerk.be.
- [35] L. Dammers, M. Carus, A. Raschka en L. Scholz, „Market Developments of Market Developments of products and chemicals,” nova-Institute for Ecology and Innovation, Huerth, Germany, 2013.
- [36] S. Huysman, *Thesis: Invloed van de vezel-matrix interface op de materiaaldemping van vlas- en koolstofvezel- versterkte composieten*, Gent: Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, 2012.
- [37] M. Dicker, P. Duckworth en e.a., „Green Composites: A review of material attributes and complementary applications,” *Composites: Part A*, vol. 56, pp. 280-289, 2014.
- [38] B. Net Composites: Weager, „Technology Overview: Biocomposites,” Materials KTN, march 2010.
- [39] M. Van de Oever en K. Molenveld, *Biocomposieten*, Wageningen UR Food & Biobased Research: DPI Value Centre, ISBN 978-90-819117-0-2, 2012.
- [40] D. Dittenber en H. GangaRao, „Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure,” *Composites: Part A*, vol. 43, pp. 1419-1429, 2012.
- [41] A. Celino, S. Freour, F. Jacquemin en P. Casari, „The hygroscopic behavior of plant fibers: a review,” *Frontiers in Chemistry*, vol. 1, pp. 1-12, 2014.
- [42] H. Dahy, *Agro-fibres Biocomposites: Applications and Design Potentials in Contemporary Architecture*, Universität Stuttgart: Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen ISBN 978-3-922302-37-7, 2015.
- [43] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink en M. Sain, „Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000 - 2010,” *Progress in polymer science*, vol. 37, pp. 1552-1596, 2012.
- [44] B. Madsen, P. Hoffmeyer en H. Liholt, „Hemp yarn reinforced composites - II,” *Composites Part A, Appl.Sci.Manuf.*, vol. 38, pp. 2204-2215, 2007.

- [45] V. Placet, O. Cisse en L. Boubakar, „Influence of environmental relative humidity and rotational behaviour of hemp fibres,” *Journal material science*, vol. 47, pp. 3435-3446, 2012.
- [46] C. Baley, „Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness,” *Composites Part A, Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, pp. 939-948, 2002.
- [47] O. Astley en A. Donald, „The tensile deformation of flax fibres as studied by X-ray scattering,” *Journal Material Science*, vol. 38, pp. 165-171, 2003.
- [48] I. Burgert, „Exploring the micromechanical design of plant cell walls,” *Journal American Botanical*, vol. 93, pp. 1391-1401, 2006.
- [49] V. Placet, F. Trivaudey, O. Cisse, V. Gucheret-Retel en L. Boubakar, „Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hempfibres,” *Composites Part A, Appl.Sci.Manuf.*, vol. 43, pp. 275-287, 2012.
- [50] K. Charlet, S. Eve, J. Jernot en J. Breard, „Tensile deformation of a flax fiber,” *Procedia Engineering (1)*, pp. 233 - 236, 2009.
- [51] Y. van Haver, „Optimalisatie van een industriële case study in vlasvezelversterkte compound via numerieke simulaties,” KU Leuven, Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen, Campus Oostende, 2014.
- [52] A. Stamboulis, C. Baillie, S. Garkhail, H. van Melick en T. Prijs, „Environmental durability of flax fibres and their composites based on polypropylene matrix,” *Applied composite materials*, vol. 7, pp. 272-294, 2000.
- [53] E. Nadali, A. Karimi, M. Tajvidi en R. Naghdi, „Natural durability of a bagasse fiber/polypropylene composite exposed to rainbow fungus,” *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 29, nr. 7, pp. 1028-1037, 2010.
- [54] D. Blauwhof, „Graduation thesis: Mycelium based materials: a case study on material driven design and forecasting acceptance,” unpublished, TU Delft, 2016.
- [55] U. Utrecht, „Research through design,” 8 july 2016. [Online]. Available: <http://www.uu.nl/en/research/microbiology/mycelium-design>.
- [56] Fungal-futures, „fungal futures,” 2016. [Online]. Available: <http://www.fungal-futures.com>.
- [57] biobasedeconomy, „biobased economy/Bouw,” 2016. [Online]. Available: <http://www.biobasedeconomy.nl/bedrijfsleven-biobased/sectoren/bouw>.
- [58] Kennisbank, „Kennisbank biobased bouwen,” 2016. [Online]. Available: <http://www.biobasedbouwen.nl>.
- [59] M. Peter, „Chitin and chitosan fungi,” 2005. [Online].
- [60] „The structure of a typical fungus,” 2016. [Online]. Available: <http://slideplayer.com/slide/4245881>.

- [61] S. Travaglini, J. Noble, P. Ross en C. Dharan, „Mycology matrix composites proceedings of the american society for composites,” may 2013. [Online]. Available: <http://www.mycoworks.com/wp-content/uploads/2014/04/UC-Berkley-Mycology-Matrix-Composites>.
- [62] M. Tien en T. Kent Kirk, „Lignin-degrading enzyme from phanerochaete chrysosporium: Purification, characterization, and catalytic properties of a unique H₂O₂-requiring oxygenase,” *Proceedings of the national academy of science of the united states of America*, pp. 2280-2284, 1983 (81).
- [63] Ecovatedesign, 2016. [Online]. Available: <http://www.ecovatedesign.com>.
- [64] T. living, „thelivingnewyork.com,” 2016. [Online]. Available: <http://thelivingnewyork.com/hy-fi-hm>.
- [65] P. Ross, 2016. [Online]. Available: <http://www.mycoworks.com/portfolio/mycotecture>.
- [66] E. Klarenbeek, „Eric Klarenbeek, designer of the unusual,” 2016. [Online]. Available: <http://www.ericklarenbeek.com>.
- [67] Corpuscoli, „Officina corpuscoli - Trans-disciplinary design & research,” 2016. [Online]. Available: <http://www.corpuscoli.com>.
- [68] R. Lelivelt, „Graduation thesis: The mechanical possibilities of mycelium materials,” TU Eindhoven, Eindhoven, 2015.
- [69] D. v. Rhee en W. v. d. Zanden, „Graduation thesis: De druksterkte van mycelium blokken en wanden met mycelium blokken,” Hogeschool Avans , Breda, 2017.
- [70] Engineering departement, „Materials data boek,” 2003. [Online]. Available: <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/cueddatabooks/materials.pdf>.
- [71] Stybenex, „basis informatie EPS: eigenschappen en gegevens,” 2014. [Online]. Available: <http://stybenex.nl/wp-content/uploads/2014/12/basisinformatie-EPS-2007.pdf>.
- [72] Synbra, „Biofoam: listing of properties 4.0,” 2011. [Online]. Available: http://agriobase.com/base/data/f_292/p_650/documents/biofoam%20spec%20sheet%2010-11%20.pdf.
- [73] C. Red, „The outlook for thermoplastics in Aerospace composites, 2014 - 2023,” 2014. [Online]. Available: <http://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-thermoplastics-in-aerospace-composites-2014-2023>.
- [74] E. Tetraproject 100147, „Toegevoegde waarde van lignocellulose bio-cracking voor bio-gebaseerde materialen,” Vlaams Innovatienetwerk, 2013.
- [75] J. Lunsford, „Natural Gas Conversation Symposium,” in *The catalytic methane conversion to higher hydrocarbons*, Oslo, 1990.
- [76] T. Dinnissen, Dow Chemicals, 2007 Chemical Seminar.

- [77] J. Priestley, „Encyclopedia forum: chemistry explained,” 2017. [Online]. Available: <http://www.chemistryexplained.com/PI-Pr/Polymers-Synthetic.html>.
- [78] W. Ehrenstein en R. Theriault, „Polymeric materials: structure, properties, applications,” Waterloo, Canada, 1977.
- [79] J. Gotro, „<http://polymerinnovationblog.com>,” 2017. [Online]. Available: <http://polymerinnovationblog.com>.
- [80] K. Tazelaar, Interviewee, *Polymeer expertise vergaard bij Universiteit Bielefeld, TU Delft, Avery Dennison, Airborne en Hogeschool Inholland*. [Interview]. 1994 - 2017.
- [81] A. Hoogendoorn en M. Verhoeckx, „Marktanalyse biocomposieten, bioharsen en biovezels,” Hogeschool Avans, Center of Expertise biobased Economy, Breda, 2015.
- [82] E. Arnold, B. Weager, H. Hoydonckx en B. Madsen, „Next Generation Sustainable Composites: Development and Processing of Furan-Flax Biocomposites,” BIOCAMP Project No.NMP2-CT-2005-515769, 2008.
- [83] A. Ibnyaich, „Masterthesis: Modification of the properties biobased thermoset resin using cellulose nano-whiskers as an additive,” University of technology, Division of manufacturing and design of wood and bionanocomposites, Luleå, Zweden, 2010.
- [84] Polynt Composites, *Technical data sheet Norsodyne*, Drocourt, France, 2015.
- [85] Sicomin, *Technical datasheet*, Châteauneuf les Martigues, Frankrijk, 2014.
- [86] Silitech en AG/SA, *Bioresin Products - Broschuere*, Guemlingen, Zwitserland: Silitech AG/SA, 2006.
- [87] Silitech AG/SA, *Technisches Datenblatt*, Gumlingen, Schweiz: Silitech, 2005.
- [88] L. Struik, „Physical ageing in plastics and other glassy materials,” *Polymer engineering and science*, vol. Vol 17, nr. No. 3, pp. 165 - 173, 1977.
- [89] G. Odegard en A. Bandyopadhyay, „Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites,” *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. vol 49, nr. (24), p. 1695-1716, 2011.
- [90] Y. Lin en X. Chen, „Investigation of moisture diffusion in epoxy system: Experiments and molecular dynamics simulations,” *Chemical Physics Letters* 412, p. 322–326, 2005.
- [91] B. Ray, A. Biswas en P. Sinha, „Characterization of hygrothermal diffusion parameters in fibre-reinforced polymeric composites,” in *Proceedings of the 4th national convention of aerospace engineers and all-India seminar on aircraft propulsion*, India, 1989.
- [92] J. Newill, S. McKnight, C. Hoppel en G. Cooper, „Effects of Coatings on Moisture Absorption in Composite Materials,” Weapons and Materials Research Directorate, Army Research Laboratory, Aberdeen, 1999.

- [93] B. Gzik, „Aging of Composite Materials,” 2007.
- [94] T. H. Nguyen, „Vieillissement artificiel et vieillissement naturel en ambiance tropicale de composites modèles époxy/verre,” 2013.
- [95] A. Rivaton, L. Moreau en J. Gradette, „Photo-oxidation of ohenoxy resins at long and short wavelengths,” 1997.
- [96] A. Forsgren, Corrosion control through organic coatings, CRC Press, 2006.
- [97] M. van Meijel, „Bio-based bank. Onderzoek naar het gebruik van bio-composiet voor alledaagse producten,” Hogeschool Inholland/composietenlab, Delft, 2016.
- [98] H. Mermet, „Influence of water ageing and UV exposure on the properties of epoxy bio composites,” Hogeschool Inholland composietenlab, Delft, 2016.
- [99] D. van der Linden, „Master thesis: The application of bio-based composites in load-bearing structures,” Hogeschool Avans, Breda, 2017.
- [100] D. Ros, C. van der Steen, D. van Delft, C. Roos en e.a., „CUR-Aanbeveling96 Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies,” Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, Gouda, 2003.
- [101] L. Ascione, J. Caron, P. Godonou, K. van Ijsselmuiden en e.a., „Prospect for new guidance in the design of FPR,” Joint Research Centre, Ispra, Italy, 2016.
- [102] M. Eikelboom, *Basispracticum composietenmaterialen*, Delft: Inholland Composietenlab, 2006.
- [103] A. Nijhof, Vezelversterkte kunsstoffen mechanica en ontwerpen, Delft: VSSD, 2004.
- [104] J. Berthelot, Mechanics of composite materials and structures, New York: Springer, 1999.
- [105] P. Bosman, P. Schreuder en M. Topp, „Vlasvezelversterkte kunststoff draagconstructies - toepasbaar in vochte omstandigheden?,” Lectoraat kunststoftechnologie Hogeschool Windesheim, Zwolle, 2015.
- [106] M. de Jong, „Keuzetool biobased plastics,” 25 maart 2015. [Online]. Available: <http://www.biobasedplastics.nl/portfolio/keuzetool-biobased-plastics/>.
- [107] A. Kil, R. Koster en J. Schouw, „Businesscase Biobased brug in Terneuzen,” 2014.
- [108] maplesoft, „Maple,” [Online]. Available: www.maplesoft.com.
- [109] N. Aydin, „Voorstudie afstudeerstage,” inholland composites, Delft, 2016.
- [110] N. Aydin, „Afstudeerrapport: Verbindingen van segmenten 'Bio-brug’,” Inholland Composites, Delft, 2017.
- [111] M. van Adrichem, „Haalbaarheidsstudie biobased economy - Onderzoek naar het verwaarden van vezelgewassen tot een biobased bank,” Hogeschool Inholland, Center of

biobased economy, Delft, 2016.

- [112] K. Beek, „Analyse scope 3 emissiebron beton,” Strukton Bouw, Utrecht, 2011.
- [113] i. lv groep, „Ketenanalyse composietbrug,” lv-groep, Papendrecht, 2013.
- [114] SustainableSurf.org, „Guide to “ECOBOARD” surfboards,” 2016. [Online]. Available: <http://sustainablesurf.org/featured-pages-parent/ecoboard/guide-to-eco-surfboards/>. [Geopend september 2016].
- [115] C. Hout, „Houtinfo.nl - infoblad,” januari 2016. [Online]. Available: http://www.houtinfo.nl/sites/default/files/Infoblad_CO2-Footprint-Hout-heeft-beste-score_%20jan2016_1.pdf. [Geopend september 2016].
- [116] S. Hegger en D. de Graaf, „Vergelijkende LCA studie bruggen,” Agentschap NL - Beco, Rotterdam, 2013.
- [117] Rijksbijdrage, „Vergelijkende LCA studie bruggen,” Rijksdienst voor ondernemend Nederland, project MJA2014bt3.001, 2013. [Online]. Available: <http://www.rvo.nl/subsidies-regelingen/projecten/vergelijkende-lca-studie-bruggen>.