



# Langetermijn- perspectieven

TETRA project C-Bridge

Deze whitepaper werd opgesteld in het kader van het TETRA project C-Bridge en verschaft inzicht in de verschillende stappen van het voorafgaande onderzoek en de opvolging van de innovatieve voetganger- en fietsersbrug in Ritsumatsyl, die opgebouwd is uit biocomposieten met het oog op een hoge duurzaamheid en milieuvriendelijkheid. Daarnaast worden ook de resultaten van LCA-studies op composietbruggen besproken.



## AANSPRAKELIJKHEID

De Universiteit Gent en degenen die aan dit product hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze publicatie. Toch kan niet worden uitgesloten dat de inhoud onjuistheden bevat. De gebruiker van dit product aanvaardt daarvoor het risico. De Universiteit Gent sluit, mede ten behoeve van de auteurs, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van informatie uit dit product.

## TOELATING TOT BRUIKLEEN

De auteurs geven de toelating dit document voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van het document te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de bepalingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit dit document.

## VLAAMSE CONTEXT

Aangezien gebruik gemaakt wordt van de Nederlandse CUR-aanbevelingen, kunnen bepaalde begrippen gebruikt in de aanbevelingen anders vertaald worden in dit document om te passen binnen de Vlaamse context.

- Poisson coefficient – Poisson-factor
- Glasovergangstemperatuur – glastransitietemperatuur
- Bureaustudie – voorstudie

## INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding .....	5
2	Bepaling optimale materialen .....	5
2.1	Voorstudie .....	6
2.1.1	Vezelmateriaal .....	6
2.1.2	Harsmateriaal .....	7
2.1.3	Kernmateriaal .....	7
2.2	Verwerving en bevindingen biogebaseerde materialen .....	7
2.3	Testen .....	8
2.3.1	Screeningstesten .....	9
2.3.2	Testen tot het verkrijgen van ontwerpeigenschappen .....	12
2.4	Optimaal composiet en toepassing in brug .....	14
2.4.1	Stijfheid, sterkte en thermische uitzetting .....	14
2.4.2	Hot/wet veroudering .....	14
2.4.3	Kruip .....	15
3	Opvolgingstesten van de brug .....	15
3.1	Componenttesten .....	16
3.1.1	Pasboutverbinding (biocomposiet – metalen onderdeel) .....	16
3.1.2	Holloboltverbinding (biocomposiet – metalen onderdeel) .....	16
3.1.3	Lijmverbinding (biocomposiet – biocomposiet) .....	17
3.2	Full-scale brugdeel test .....	18
3.3	Monitoring .....	20
4	Levenscyclusanalyse (LCA) .....	21
4.1	LCA-studies Ritsumasyl .....	21
4.1.1	Circulariteitsscan (Acker, 2019) .....	21
4.1.2	Duurzaamheidsscan (Verstege, 2020) .....	22
4.1.3	Vergelijking circulariteitsscan en duurzaamheidsscan .....	22
4.2	LCA-studies composietbruggen .....	23
4.2.1	Belangrijkste conclusies uit vergelijkende studies in de literatuur .....	23
4.2.2	Algemene conclusies: verschillen en gelijkenissen tussen studies .....	24
5	Structurele samenwerking composiet met andere materialen .....	25
6	Conclusie .....	25
7	Referenties .....	25

## LIJST MET FIGUREN

Figuur 1: Biocomposietbrug Ritsumasyl.....	5
Figuur 2: Schema selectieproces biocomposieten.....	6
Figuur 3: Sterkte en stijfheid per vezeltype, op basis van (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017) .....	6
Figuur 4: Laminaatproefstukken (Claassen, 2019).....	9
Figuur 5: Resultaten screeningstesten voor laminaten niet blootgesteld aan verouderingscondities (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018).....	10
Figuur 6: Resultaten screeningstesten voor laminaten blootgesteld aan verouderingscondities (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018).....	11
Figuur 7: Kracht-ervormingdiagram van de ILSS-testen op het blootgestelde composiet van AmpliTex en Polynt 1580 IBA (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018) .....	11
Figuur 8: Afschuifsterkte na blootstelling aan verschillende omgevingscondities, op basis van (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018) .....	13
Figuur 9: Blootstellingsfactor per eigenschap voor elk van de composieten, op basis van (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018) .....	13
Figuur 10: Kruipfactor bij belasting van 15 MPa in UD-lagen bij biocomposiet en glasvezelcomposiet, op basis van (Claassen, 2019) en (CROW-CUR, 2019).....	15
Figuur 11: Opvolgingstesten.....	16
Figuur 12: Test op pasboutverbinding (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017).....	16
Figuur 13: Faalmodus pasboutverbinding (Claassen, 2019) .....	16
Figuur 14: Test op holloboltverbinding (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017).....	17
Figuur 15: Test op lijmverbinding met lapnaad (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017).....	17
Figuur 16: Test op lijmverbinding met driepuntsbuigproef met lokale verdikking (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017).....	17
Figuur 17: ILSS-test op lijmverbinding (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017).....	18
Figuur 18: Voorontwerp dwarsdoorsnede met aanduiding full-scale model (Claassen, 2019).....	18
Figuur 19: Full-scale model (Claassen, 2019) .....	19
Figuur 20: Kruipproef (Claassen, 2019) .....	19
Figuur 21: Vermoeiingsproef op full-scale model (Claassen, 2019).....	20
Figuur 22: Monitoringprogramma (Claassen, 2019) .....	20

## LIJST MET TABELLEN

Tabel 1: Kost en verkrijgbaarheid, kwaliteitscontinuïteit en ecologische beoordeling productieproces per vezeltype, op basis van (Souren, Bio-based brug RitsumasyI - materialen, productieproces, testen, 2017).....	7
Tabel 2: Geselecteerde vezelproducten (Souren, Bio-based brug RitsumasyI - materialen, productieproces, testen, 2017) .....	8
Tabel 3: Geselecteerde harsproducten (Souren, Bio-based brug RitsumasyI - materialen, productieproces, testen, 2017) .....	8
Tabel 4: Geselecteerde vezel-harscombinaties, op basis van (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018).....	12
Tabel 5: Eigenschappen van de gebruikte laminaten (Willem Souren, 2019) .....	14

## 1 INLEIDING

Omwille van de groeiende nood en aandacht voor het milieu en duurzaamheid, wordt ook in de bruggenbouw met composieten aandacht geschonken aan ecologisch verantwoorde productiemethoden en materialen. Naar de toekomst toe zal dit volgens de huidige trends steeds in belang blijven groeien. Een vooruitstrevend voorbeeld hiervan is de biocomposietbrug in Ritsumasyl in de Nederlandse provincie Friesland, die het onderwerp van deze whitepaper vormt. Het veelvoud aan prijzen gericht op duurzame innovatie waarvoor het project genomineerd werd (Nederlandse Bouwprijs 2019, InfraTech Innovatieprijs 2019, Lighthouse club Award 2019) of zelfs als winnaar uitkwam (Circular Award Public 2019) tonen het belang voor de toekomst aan.



**Figuur 1: Biocomposietbrug Ritsumasyl**

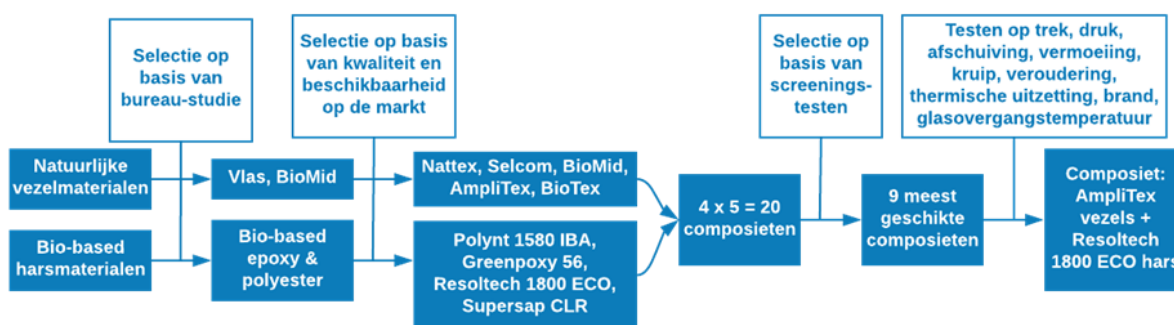
Door het innovatieve domein waarin het project zich bevindt is een grote mate aan onderzoek aan de constructie voorafgegaan. Het uitvoeren van testen is cruciaal bij het gebruik van dergelijke nieuwe materialen doorheen het volledige ontwerp- en constructieproces: zo wordt een veelvoud van materialen getest om tot een optimale materiaalkeuze te komen, waarna nieuwe uitgebreidere testen volgen om tot ontwerpeigenschappen te komen. Tijdens de ontwerpfase worden testen uitgevoerd op modellen op schaal of ware grootte van componenten en van het volledige brugdeel om op basis daarvan het ontwerp bij te sturen tot uiteindelijk een definitief ontwerp volgt. Ook na de oplevering in 2019 blijft de toestand van de brug nauw opgevolgd worden via een monitoringprogramma.

De kennis die hierin werd opgedaan zal ongetwijfeld ook voor toekomstige projecten van belang zijn. De stappen in het project en de belangrijkste bevindingen worden in deze whitepaper samengevat op basis van de rapporten die beschikbaar werden gesteld via de website van het project, [www.drive.frl/biocomposiet](http://www.drive.frl/biocomposiet), op datum van 14 september 2020. Er wordt steeds verwezen naar de documenten waarin meer gedetailleerde informatie over het onderzoek kan teruggevonden worden.

## 2 BEPALING OPTIMALE MATERIALEN

In de eerste fase van het project wordt via een selectieproces bepaald welke biologische materialen het meest geschikt zijn voor gebruik in brugtoepassingen. Hierbij wordt gekeken naar het vezelmateriaal, het harsmateriaal en het kernmateriaal. De vooropgestelde doelstellingen hieromtrent zijn dat de vezels volledig natuurlijk moeten zijn en dat het hars zoveel mogelijk uit biologisch materiaal moet bestaan. Een volledig biologisch hars is immers nog niet haalbaar in praktijk. De studie i.v.m. materialen is terug te vinden in (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017).

Het selectieproces, weergegeven in Figuur 2, vertrekt vanuit een ruim gamma aan natuurlijke vezeltypes en biogebaseerde harsen. In een voorstudie die steunt op openlijk verkrijgbare informatie wordt reeds een eerste selectie gemaakt van de te gebruiken materiaalsoorten. Vervolgens wordt nagegaan welke producten op de markt verkrijgbaar zijn en worden deze getoetst aan enkele eisen, waaruit een lijst van in aanmerking komende producten komt. In de volgende stap worden samples van deze producten verwerkt tot composieten in laminaatvorm. Een reeks relatief eenvoudige screeningstesten wijst uit welke composieten voldoende veelbelovend zijn om in meer detail te worden getest, waaruit ten slotte een sterk gefundeerde keuze van de optimale vezel-harscombinatie kan gemaakt worden.

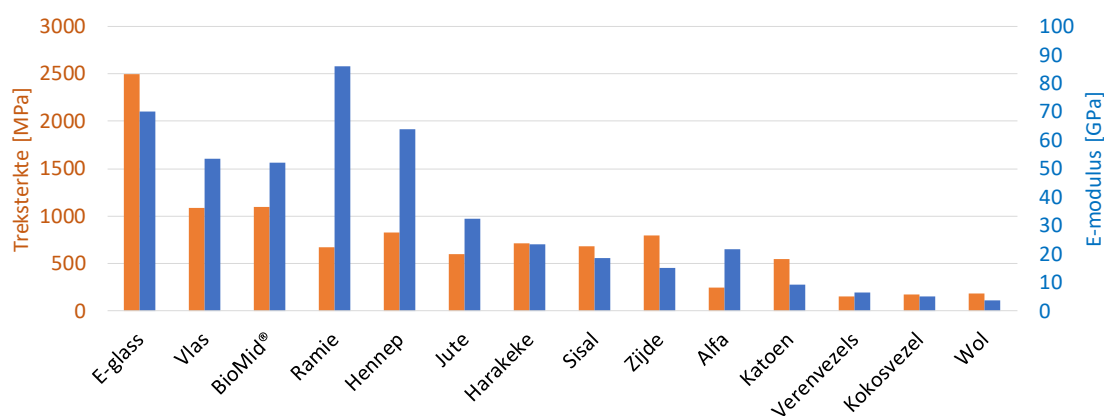


Figuur 2: Schema selectieproces biocomposieten

## 2.1 Voorstudie

### 2.1.1 Vezelmateriaal

Een eerste selectie van geschikte vezelmateriaal gebeurt op basis van een vergelijking van de sterkte en stijfheid van een reeks natuurlijke vezels, geheel gebaseerd op wat in de literatuur en door producenten beschikbaar is aan informatie. In Figuur 3 worden beide mechanische eigenschappen weergegeven voor verschillende vezeltypes, alsook voor het niet-biologische E-glass dat ter referentie dient. Uit deze vergelijking volgt dat vlas, BioMid®, ramie en hennep het meest in aanmerking komen. BioMid® is de productnaam van een hoog-kristallijne cellulosevezel vervaardigd uit zaagresten uit de houtindustrie. Ramie, ook gekend als Chinees gras, is een sterke, plantaardige vezelsoort uit de brandnetelfamilie die van nature voorkomt in oostelijk Azië.



Figuur 3: Sterkte en stijfheid per vezeltype, op basis van (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)

Vervolgens wordt voor de overblijvende vezeltypes verder gekeken naar de kost, de verkrijgbaarheid, de kwaliteitscontinuïteit en de mate waarin het productieproces ecologisch verantwoord is. Een overzicht wordt weergegeven in Tabel 1.

**Tabel 1: Kost en verkrijgbaarheid, kwaliteitscontinuïteit en ecologische beoordeling productieproces per vezeltype, op basis van (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)**

<b>Vezeltype</b>	<b>Kost en verkrijgbaarheid</b>	<b>Kwaliteitscontinuïteit</b>	<b>Ecologisch productieproces</b>
Vlas	Goed	Matig	Goed
BioMid®	Matig	Goed	Goed
Ramie	Slecht	Matig	Ongekend
Hennep	Goed	Matig	Goed

De mechanische eigenschappen in acht gehouden, worden hieruit vlasvezel en BioMid® geselecteerd voor verder onderzoek.

### 2.1.2 Harsmateriaal

Zowel thermoharders als thermoplasten kunnen gebruikt worden als matrix in het composietmateriaal. Ten gevolge van de hogere brandgevoeligheid van vlasvezels t.o.v. glasvezels moet bij gebruik van een thermoplast echter gelet worden op de smelttemperatuur die lager dan 200°C moet zijn. Bovendien moet de impregnatie en consolidatie van het hars gebeuren onder uitsluiting van zuurstof. Thermoplasten die hieraan voldoen zijn polypropreen (PP), polyetheen (PE) en polymelkzuur (PLA). Hieruit geniet PLA de voorkeur omwille van de natuurlijke oorsprong. Een nadeel aan thermoplasten is de noodzaak een oven te gebruiken, die voldoende groot moet zijn voor de te produceren brugplaten.

Onder de thermoharders zijn verschillende gedeeltelijk biogebaseerde polyesters en epoxies beschikbaar. Hierbij wordt een afweging gemaakt tussen een zo hoog mogelijke biologische oorsprong en een zo goed mogelijke verwerkbaarheid bij vacuïminjectie. Deze eigenschappen blijken elkaar immers vaak tegen te werken. De biologische materie kan bijvoorbeeld een grote warmteontwikkeling veroorzaken tijdens de uitharding, wat uitzettings- en krimpverschijnselen, thermische aantasting en zelfontbranding kan teweegbrengen. Verder moet ook rekening gehouden worden met de bevochtiging en hechting van de harsen en de vezels. Dit vormt een bijkomende moeilijkheid bij het gebruik van natuurlijke vezels. Diverse maatregelen zijn voorhanden om dit te verbeteren. Deze zijn terug te vinden in (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017).

In het rapport wordt in de bespreking over de voorstudie niet expliciet vermeld welke harstypes het meest geschikt gebleken zijn. In de volgende fases wordt echter uitsluitend gewerkt met de thermoharders polyester en epoxy, wat impliceert dat deze in de voorstudie meer geschikt gebleken zijn dan de thermoplasten.

### 2.1.3 Kernmateriaal

De criteria voor het kernmateriaal zijn een zo laag mogelijk soortelijk gewicht, een voldoende hoge afschuifweerstand en een natuurlijke oorsprong. Balsahout is hiervoor goed geschikt. Het gekozen materiaal is Balsa Baltek SB150. Een alternatief dat overwogen werd is PLA-schuim, hoewel dit minder gunstige eigenschappen en een hogere kostprijs heeft.

## 2.2 Verwerving en bevindingen biogebaseerde materialen

Voor elk van de vezelmateriaal die resulteerden uit de voorstudie werden meerdere leveranciers gecontacteerd om concrete gegevens te verwerven omtrent de permeabiliteit, het doekgewicht, de verkrijgbaarheid in grote hoeveelheden en de kost van hun product. Hetzelfde werd gedaan voor de harsen, waarbij eveneens gelet werd op de verkrijgbaarheid en de kost, alsook de viscositeit, de piekexotherm, de verwerkingstemperatuur, de post-cure temperatuur en de geltijd.

Na eliminatie op basis van vereisten die gesteld werden op deze eigenschappen resteerden de vezel- en harsmaterialen van een beperkt aantal leveranciers, waarvan vervolgens samples besteld werden



om in verschillende combinaties van vezel- en harstypes verder te verwerken tot laminaten met de vacuüminjectietechniek. Hieruit werd duidelijk of de materialen al dan niet geschikt zijn voor deze techniek. Wanneer dit het geval is, kunnen de resulterende laminaten in een volgende fase onderworpen worden aan verschillende testen. Dit bleek zo te zijn voor alle vezel- en harstypes.

De leveranciers, productnamen en bijhorende bevindingen van de resterende vezel- en harstypes zijn opgelijst in Tabel 2 en Tabel 3 respectievelijk.

**Tabel 2: Geselecteerde vezelproducten (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)**

Leverancier	Productnaam	Bevindingen
Flax Technic	Nattex	Vlas, grove legsels, beschadiging bij lossen van peel-ply
Selcom	Selcom	Vlas, goede verdeling tussen bundelgrootte en tussenruimte, goed injecteerbaar, goede vezelvolumefractie
Terre de Lin	Terre de Lin	Vlas, bundels met veel tussenruimte, lage vezelvolumefractie
FRP Services	BioMid	Constante kwaliteit, laag doekgewicht, slechte permeabiliteit
BComp	AmpliTex	Vlas, fijn constant legsel, redelijke permeabiliteit, uitstekende benutting, vezels komen los aan geknpte randen
Composites Evolution	BioTex	Vlas, constante kwaliteit, goede permeabiliteit, goede benutting

**Tabel 3: Geselecteerde harsproducten (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)**

Leverancier	Productnaam	Bevindingen
Polynt Composites	Polynt 1580 IBA	Bio-polyester, goed verkrijgbaar, goede viscositeit, goed instelbaar, lage piekexotherm, sterke verbleking
Sicomin	Greenpoxly 56	Bio-epoxy, goed verkrijgbaar, goede viscositeit, te korte geltijd, zeer hoge piekexotherm, ongeschikt voor grote constructies, weinig verbleking
Resoltech	Resoltech 1800 ECO	Bio-epoxy, goed verkrijgbaar, goede viscositeit, lange potlife, lage piekexotherm, lichte verbleking
Entropy Resins	Supersap CLR	Bio-epoxy, goed verkrijgbaar, goede viscositeit, goed instelbaar, acceptabele piekexotherm, sterke verbleking
Polynt	ER16773	Bio-polyester, niet goed verkrijgbaar
Scott Bader	L6184- SPR17043	Bio-polyester, goed verkrijgbaar, goede viscositeit, goed instelbaar, lage piekexotherm

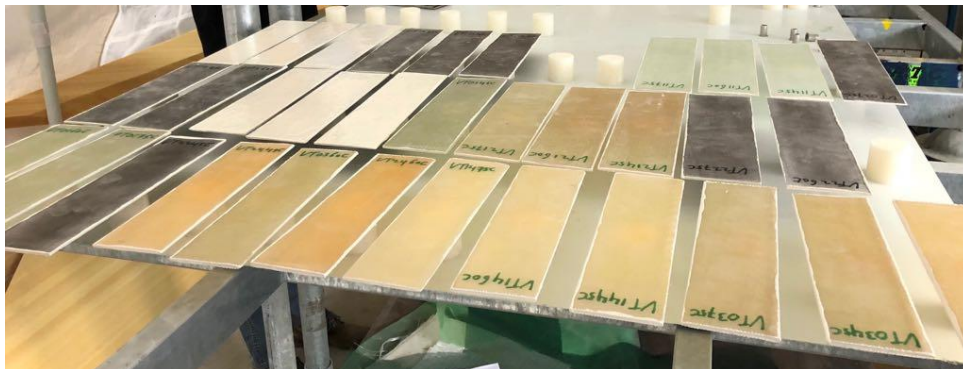
## 2.3 Testen

Een reeks testen op de verkregen laminaten dient uit te wijzen welke combinaties van vezel- en harstypes optimaal zijn om uiteindelijk te gebruiken in de brug in Ritsumasyl. De testen bestaan uit twee delen. De eerste reeks dient als screening om te bepalen welke laminaten voldoen om in de tweede reeks testen een groter aantal ontwerpeigenschappen van te bepalen die vervolgens gebruikt worden in een constructieve berekening volgens Eurocode 0.

Alle details omtrent de screeningstesten zijn terug te vinden in het rapport (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018). De resultaten van een deel van de tweede reeks testen zijn gegeven in het rapport (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018).

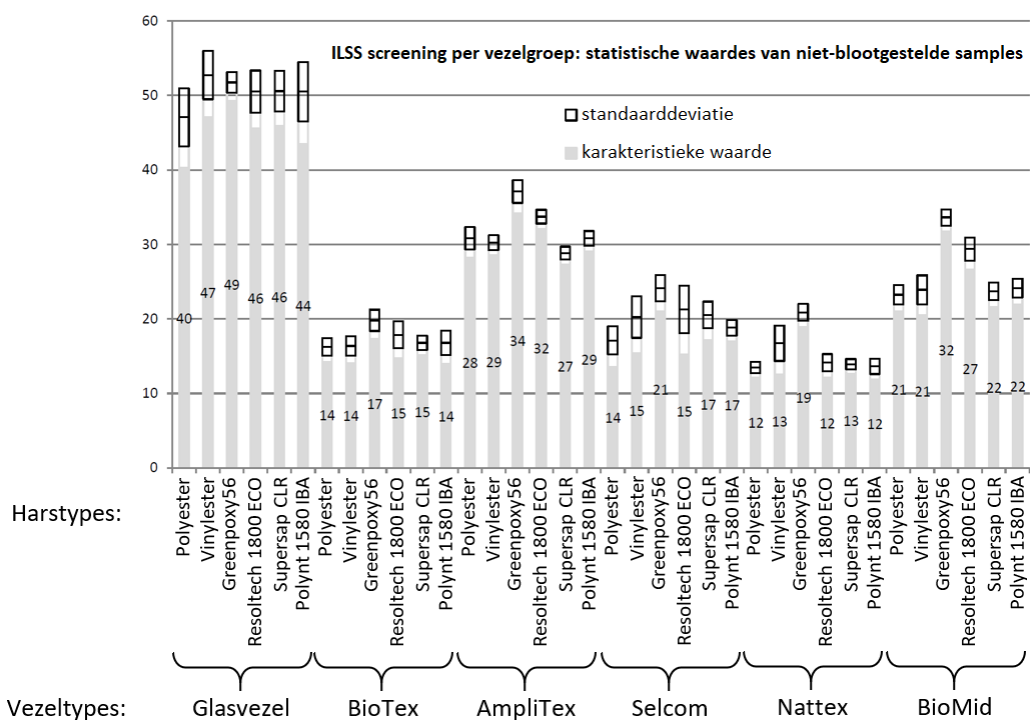
### 2.3.1 Screeningstesten

De laminaten bestaan uit alle mogelijke combinaties van de geselecteerde vezel- en harstypes in Tabel 2 en Tabel 3. Echter zijn geen gegevens beschikbaar over de laminaten bestaande uit het vezelproduct Terre de Lin en uit de harsproducten ER16773 van Polynt en L6184-SPR17043 van Scott Bader. Gezien er vijf vezelproducten en vier harsproducten gebruikt worden, levert dit 20 combinaties op. Ter vergelijking met conventionele niet-biologische materialen worden de vezelproducten uitgebreid met glasvezels en de harsproducten met polyester en vinylester, waardoor in totaal 36 laminaten getest worden. Enkele voorbeelden van de laminaatproefstukken zijn weergegeven in Figuur 4.



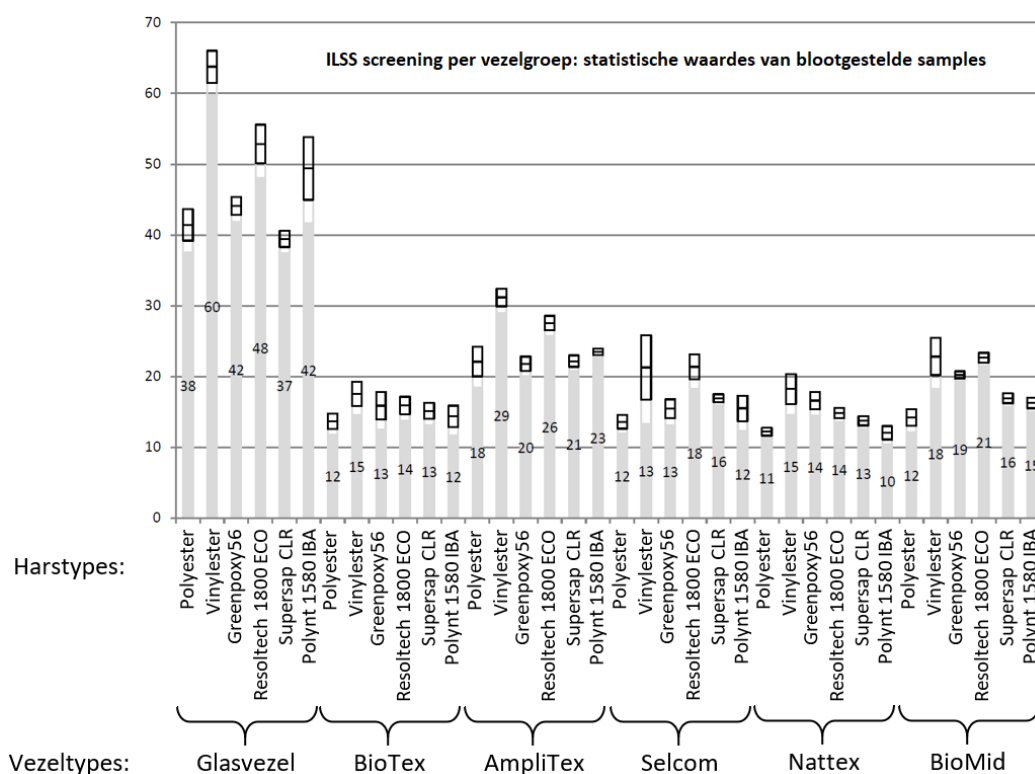
**Figuur 4: Laminaatproefstukken (Claassen, 2019)**

Deze proefstukken worden vervolgens versneden tot kleinere plaatjes van 8 op 30 mm met een dikte van 4 mm, waarop de testen uitgevoerd worden. De screeningstesten bestaan uit ILSS-testen die de interlaminaire afschuifsterkte bepalen, enerzijds op proefstukken die op kamertemperatuur bewaard worden en anderzijds op proefstukken die enkele uren blootgesteld worden aan warm water om verouderingseffecten na te bootsen. De interlaminaire afschuifsterkte is een indicatie voor de hechting tussen de vezels en de harsmatrix. De resultaten van de proeven zijn weergegeven in Figuur 5. Doordat elk laminaattype meerdere keren getest wordt, kan ook een standaarddeviatie en een veilige karakteristieke waarde bepaald worden. De standaarddeviatie is hierbij een maat voor de kwaliteitscontinuïteit.



**Figuur 5: Resultaten screeningstesten voor laminaten niet blootgesteld aan verouderingscondities (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018)**

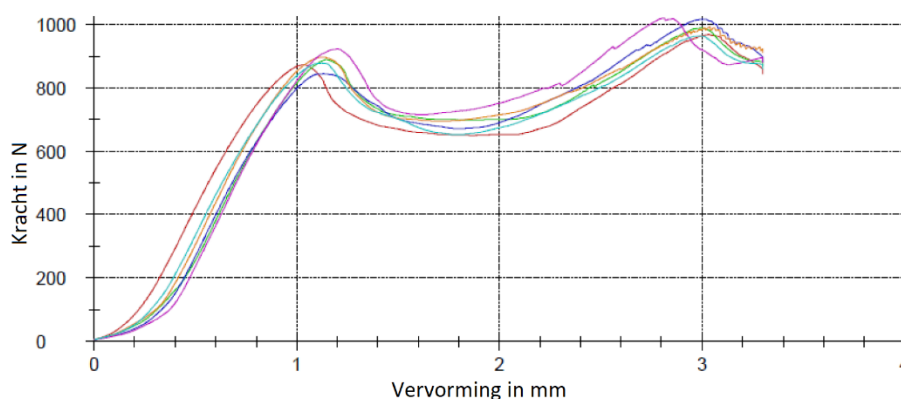
Hierbij dient opgemerkt te worden dat de eerste twee proefstukken in de grafiek 0% biogebaseerd zijn. Glasvezels leiden voor alle harstypes tot hogere afschuifsterktes dan de natuurlijke vezels. Het beste resultaat wordt behaald door de combinatie van glasvezel met vinylester. Opmerkelijk is dat glasvezel in combinatie met elk van de biogebaseerde harsen beter presteert dan in combinatie met het gebruikte polyester. Bij de natuurlijke vezels resulteren de vlasvezels AmpliTex en de cellulosevezels BioMid in de hoogste afschuifsterktes, vooral in combinatie met het hars Greenpoxy56. Wanneer de proefstukken voorafgaand aan de testen worden ondergedompeld in warm water, blijven dezelfde observaties gelden, met als enige verschil dat alle afschuifsterktes gereduceerd worden, met uitzondering van glasvezel i.c.m. vinylester. Deze resultaten zijn weergegeven in Figuur 6. Verder werden de proefstukken ook getest nadat ze een dag bij -18°C bewaard werden, hoewel de resultaten hiervan niet beschikbaar zijn.



**Figuur 6: Resultaten screeningstesten voor laminaten blootgesteld aan verouderingscondities (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018)**

De tijdsduur van het onderdompelen van de laminaten wordt in (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017) vastgelegd als één dag en de watertemperatuur als 80°C. In het rapport (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018), dat op latere datum verscheen, wordt echter vermeld dat de omgevingscondities nog niet gekend zijn. De mogelijkheid bestaat dus dat de omgevingscondities gewijzigd zijn tussen de data van het verschijnen van de twee rapporten.

Uit de testen is gebleken dat falen door afschuiving enkel bij glasvezels met zekerheid kan aangeduid worden als de faalmodus. In sommige laminaten is buiging in plaats van afschuiving de oorzaak van falen. Voor enkele proefstukken bereikt het kracht-vernemingdiagram een initiële piek, waarna de kracht terug daalt en vervolgens stijgt tot boven de initiële piek. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in Figuur 7 voor het blootgestelde composiet bestaande uit AmpliTex en Polynt 1580 IBA. Wanneer dit piekgedrag zich voordoet, wordt de kracht overeenstemmend met de initiële piek gebruikt om de afschuifsterkte te bepalen. De rekenwaarde van de afschuifsterkte is dan gelijk aan 75% van de voornoemde kracht gedeeld door de opgemeten oppervlakte van de dwarsdoorsnede.



**Figuur 7: Kracht-vernemingdiagram van de ILSS-testen op het blootgestelde composiet van AmpliTex en Polynt 1580 IBA (Bosman P. , ILSS screening (O1) - Internal test report, 2018)**

### 2.3.2 Testen tot het verkrijgen van ontwerpeigenschappen

De vezel-harscombinaties waar verder mee gewerkt wordt zijn aangegeven in Tabel 4. De precieze materialen of producten zijn niet vermeld in de laatst beschikbaar gestelde rapporten (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018), waardoor de vezel- en harstypes in wat volgt benoemd worden met nummeringen. Het is echter wel bekend dat vezeltype 1 overeenstemt met glasvezel.

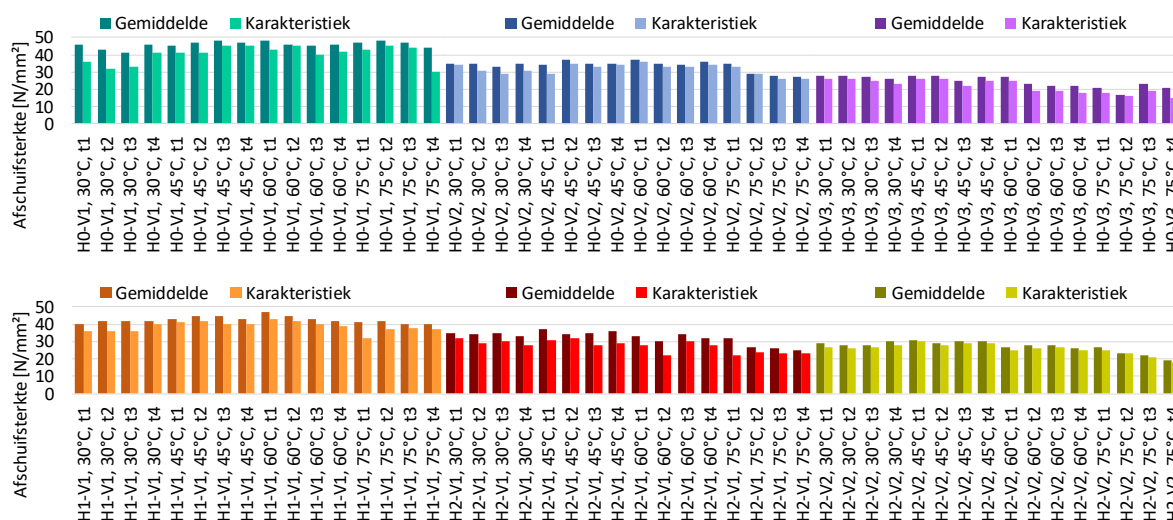
**Tabel 4: Geselecteerde vezel-harscombinaties, op basis van (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018)**

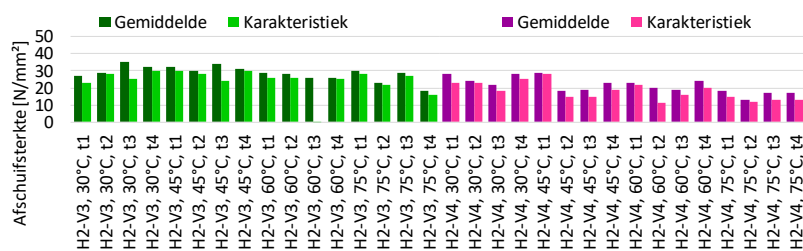
Harstype \ Vezeltype	1	2	3	4
0	H0-V1	H0-V2	H0-V3	
1	H1-V1			H1-V4
2	H2-V1	H2-V2	H2-V3	H2-V4

Teneinde alle benodigde ontwerpeigenschappen van de composietmaterialen te bepalen, worden op de geselecteerde composieten nogmaals ILSS-testen uitgevoerd, dit keer met een groter aantal herhalingen per test en met een grotere waaier aan omgevingscondities, waarnaar verwezen wordt als hot/wet verouderingstesten. Daarnaast worden de proefstukken ook beproefd op trek, druk, afschuiving in het vlak, de glastransitietemperatuur, UV-veroudering, vermoeiing, kruip, uitzettingsgedrag en brand. De uitvoeringsgegevens van deze proeven worden beschreven in (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017). Echter zijn enkel de resultaten van de afschuifsterkte uit de ILSS-testen beschikbaar, en dit voor de combinaties in Tabel 4 met uitzondering op H1-V4.

#### 2.3.2.1 Hot/wet verouderingstesten

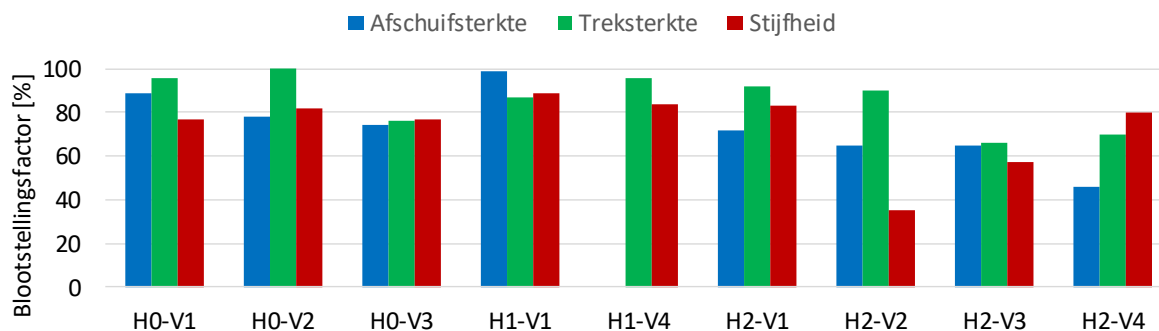
In de hot/wet verouderingstesten worden de proefstukken vooraf bewaard in verschillende combinaties van omgevingscondities. Hierbij wordt gevarieerd op de temperatuur, gaande van 30°C tot 75°C, en de tijdsduur van de blootstelling, gaande van t1 (kortst) tot t4 (langst). De exacte tijdsduren zijn niet gekend. Het gebruik van vier verschillende blootstellingstemperaturen en vier tijdsduren leidt tot 16 combinaties per proefstuk. Door elke test meermaals uit te voeren, kan voor elke test een gemiddelde en karakteristieke waarde bepaald worden. Deze resultaten zijn weergegeven in Figuur 8.





Figuur 8: Afschuifsterkte na blootstelling aan verschillende omgevingscondities, op basis van (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018)

Om de opgemeten eigenschappen te interpreteren en hieruit het effect van de veroudering in te schatten wordt een blootstellingsfactor gedefinieerd, gelijk aan de verhouding van de opgemeten grootte na blootstelling aan bepaalde omgevingscondities op dezelfde grootte na slechts een minimale blootstelling bij 30°C en tijdsduur t1. Indien de eigenschappen reduceren t.g.v. de omgevingscondities, is de blootstellingsfactor dus kleiner dan 1. In Figuur 9 wordt voor elk compositiet de laagste blootstellingsfactor van alle proeven getoond in percentages voor de afschuifsterkte, treksterkte en stijfheid. Hieruit wordt duidelijk welke composieten het meest gevoelig zijn aan veroudering. Absolute waarden van de treksterkte en stijfheid zijn zoals eerder vermeld niet vrijgegeven.



Figuur 9: Blootstellingsfactor per eigenschap voor elk van de composieten, op basis van (Bosman P. , ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report, 2018)

De kleinste gemiddelde reductie van de grootheden wordt vastgesteld bij het niet-biologische H1-V1. Onder de biogebaseerde composieten vertonen H0-V2, H0-V3 en H1-V4 de beste weerstand tegen veroudering. Tot slot vindt de grootste reductie plaats bij H2-V2, H2-V3 en H2-V4, wat erop wijst dat harstypen H2 tot een minder goede verouderingsweerstand leidt.

Het opgemeten sterkteverlies is een maat voor de reactiesnelheid, die in de Arrhenius-vergelijking gebruikt wordt om de levensduur van het materiaal in kwestie ten gevolge van omgevingscondities te voorspellen.

### 2.3.2.2 Vermoeiing

Vermoeiing vormt een belangrijk aandachtspunt voor deze brug in het bijzonder omwille van de beweegbare onderdelen die scheepvaart onder de brug mogelijk maken. De proefstukken worden getest op vermoeiingsschade onder invloed van schuif-, trek- en drukspanning. Daaruit wordt een S-N curve opgesteld waarmee eveneens een levensduur kan bepaald worden. De treksterkte vermoeiingseigenschappen zijn voor biocomposieten gelijkwaardig gebleken aan glasvezelcomposieten (Willem Souren, 2019).

### 2.3.2.3 Kruip

De breuksterkte en vervorming worden bepaald voor afschuiving en voor trek bij verschillende belastingen die voor enkele maanden aangebracht worden.

Om het effect van kruip op de breuksterkte te bepalen wordt een belasting variërend tussen 70 en 90% van de maximale onmiddellijke belasting aangebracht en wordt de tijdsduur tot het bezwijken van het proefstuk opgemeten. Als resultaat wordt per proefstuk een curve verkregen van de breuksterkte als functie van tijd. Het effect op vervorming wordt bepaald door de vervorming frequent op te meten bij een relatief lage belasting omdat in dit geval breuk vermeden moet worden. Per proefstuk kunnen voor verschillende belastingen verschillende curves van de vervorming als functie van tijd resulteren. Er zijn geen gegevens over de resultaten van de kruipproeven op de verschillende materialen beschikbaar gesteld.

## 2.4 Optimaal composiet en toepassing in brug

De combinatie die als meest optimaal bevonden werd en gekozen werd voor toepassing in de brug bestaat uit AmpliTex vlasvezels en Resoltech 1800 ECO bio-epoxy als hars, met een vezelvolumefractie van 50%. De laminaten worden opgebouwd uit meerdere unidirectionele (UD) of quasi-isotrope (QI) legfels. De QI-legfels hebben de opbouw  $[0/90/\pm 45_2]$  omdat deze een snelle productie toelaat. De lijfplaten en schotten zijn uitsluitend opgebouwd uit QI-legfels. De bodemplaaf van de brug bestaat voor de helft uit UD-legfels en voor de helft uit QI-legfels, waarbij de UD-legfels in de lengterichting van de brug geplaatst worden.

### 2.4.1 Stijfheid, sterkte en thermische uitzetting

De berekende stijfheids- en sterkte-eigenschappen en lineaire uitzettingscoëfficiënt van de legfels en de laminaten worden weergegeven in Tabel 5. De sterkte-eigenschappen zijn rekenwaarden bepaald conform NEN-EN 1990 bijlage D7.3.

Tabel 5: Eigenschappen van de gebruikte laminaten (Willem Souren, 2019)

Grootheid	UD-lamina	0/90-lamina	QI-laminaat	½ UD + ½ QI-laminaat
<b>Stijfheidseigenschappen</b>				
Stijfheid langsrichting, $E_x$	24,0 GPa	14,6 GPa	10,8 GPa	17,4 GPa
Stijfheid dwarsrichting, $E_y$	5,0 GPa	14,6 GPa	10,8 GPa	8,2 GPa
Glijdingsmodulus, $G_{xy}$	1,4 GPa	1,4 GPa	4,0 GPa	2,7 GPa
Poisson factor, $\nu_{xy}$	0,3	0,1	0,34	0,33
<b>Rekenwaarden van sterkte-eigenschappen</b>				
Treksterkte langsrichting, $f_{xt,Rd}$	166,0 MPa	111,0 MPa	92,0 MPa	130,0 MPa
Treksterkte dwarsrichting, $f_{yt,Rd}$	22,0 MPa	111,0 MPa	92,0 MPa	57,0 MPa
Druksterkte langsrichting, $f_{xc,Rd}$	79,6 MPa	48,4 MPa	35,8 MPa	57,7 MPa
Druksterkte dwarsrichting, $f_{yc,Rd}$	22,0 MPa	48,4 MPa	35,8 MPa	28,0 MPa
Afschuifsterkte, $\tau_{xy,Rd}$	22,1 MPa	22,1 MPa	22,1 MPa	22,1 MPa
<b>Lineaire uitzettingscoëfficiënt</b>				
$-20^\circ\text{C} \leq T \leq +10^\circ\text{C}$ (langs), $\alpha_1$	$8,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$23,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$23,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$12,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
$+10^\circ\text{C} \leq T \leq +40^\circ\text{C}$ (langs), $\alpha_1$	$0,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$17,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$17,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
$-20^\circ\text{C} \leq T \leq +10^\circ\text{C}$ (dwars), $\alpha_2$	$83,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$23,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$23,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$43,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
$+10^\circ\text{C} \leq T \leq +40^\circ\text{C}$ (dwars), $\alpha_2$	$83,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$17,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$17,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$39,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

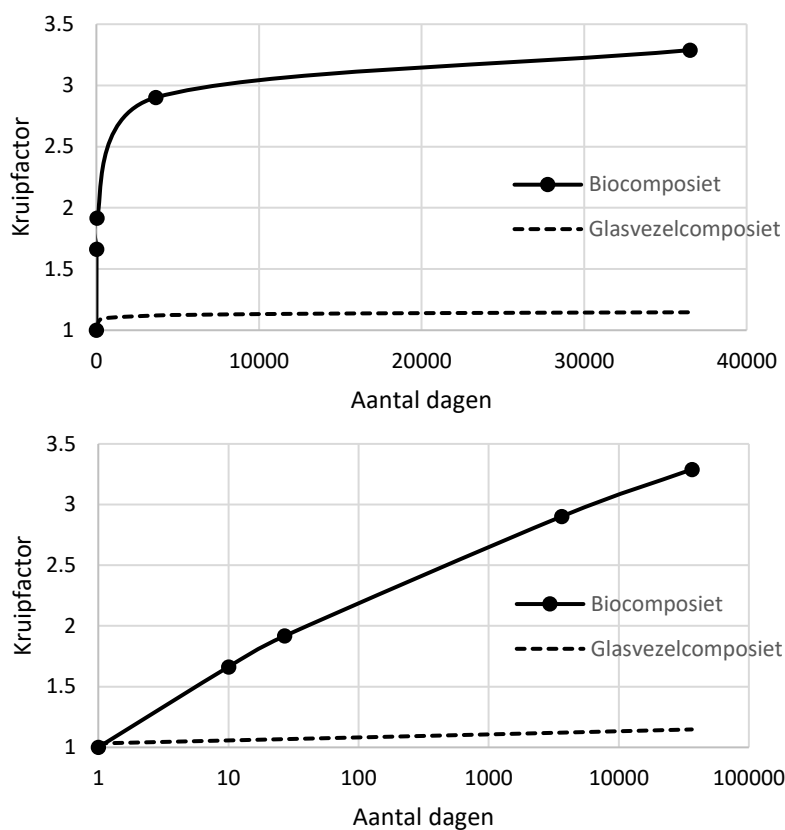
### 2.4.2 Hot/wet veroudering

Verouderingseffecten zoals besproken in sectie 2.3.2.1 worden concreet in rekening gebracht door bepaalde eigenschappen te delen door een hot-wetfactor groter dan 1. Uit de testen volgt dat de

gemiddelde waarde van de hot-wetfactor van het composiet 1,637 is indien geen bescherming wordt aangebracht, wat wijst op een grote vochtgevoeligheid. Dankzij een coating worden de gemiddelde en 95%-karakteristieke waarde gereduceerd tot respectievelijk 1,016 en 1,029 voor een levensduur van 100 jaar. Uit veiligheidsoverwegingen wordt dit echter verhoogd tot 1,2 (Willem Souren, 2019).

### 2.4.3 Kruip

Analoog aan de hot-wetfactor wordt ook een kruipfactor gebruikt om de reductie op sterkte en de vergroting van de vervorming in te rekenen. De kruipvervorming is zodanig groot dat een deel van deze vervorming reeds vooraf wordt gerealiseerd door de constructie 30 dagen te laten voorkruipen. De kruipfactor bij een belasting van 15 MPa op een laminaat opgebouwd uit UD-lamellen wordt weergegeven in Figuur 10. Voor een periode van 100 jaar is de kruipfactor 3,29. Om het belang hiervan te duiden, wordt ter vergelijking ook de kruipfactor van een laminaat uit UD-lamellen uit glasvezelcomposiet weergegeven, die slechts een waarde van 1,15 bereikt voor een periode van 100 jaar (CROW-CUR, 2019).

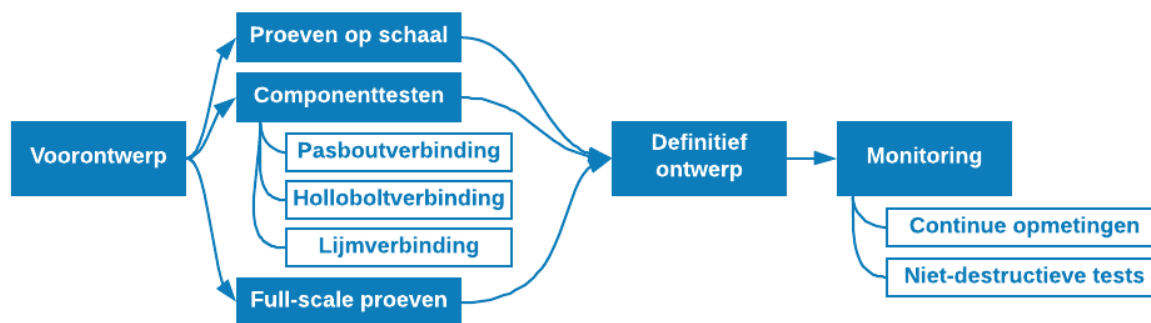


Figuur 10: Kruipfactor bij belasting van 15 MPa in UD-lagen bij biocomposiet en glasvezelcomposiet, op basis van (Claassen, 2019) en (CROW-CUR, 2019)

## 3 OPVOLGINGSTESTEN VAN DE BRUG

Zodra gekend is welke materialen gebruikt zullen worden en de bijhorende materiaaleigenschappen verworven zijn, kunnen proeven uitgevoerd worden die betrekking hebben op het ontwerp van de brug. Zoals schematisch weergegeven in Figuur 11, betreft dit componenttesten op verbindingen, proeven op schaalmodellen en vervolgens een full-scale test op een deel van de brug. Nadien wordt ook uitvoerig aan monitoring gedaan om op te volgen hoe de brug zich gedraagt na verloop van tijd.





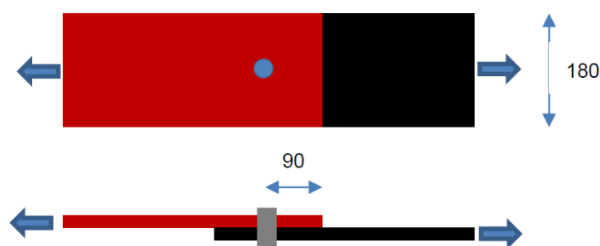
Figuur 11: Opvolgingstesten

### 3.1 Componenttesten

Naast de bouwmaterialen zelf moeten ook verbindingen van biocomposieten met elkaar of met metalen onderdelen getest worden, zodat op basis hiervan verbindingen in de brug kunnen ontworpen of bijgestuurd worden. In deze reeks testen worden pasbout- en holloboltverbindingen gebruikt om de verbinding met een metalen onderdeel te realiseren. Biocomposieten worden onderling verbonden met lijm. De drie verbindingstypes worden zowel onderworpen aan een statische belasting als aan een vermoeiingsbelasting. Resultaten van deze testen zijn niet beschikbaar.

#### 3.1.1 Pasboutverbinding (biocomposiet – metalen onderdeel)

De pasboutverbinding bestaat uit een overlapping tussen het laminaat en de stalen plaat, ook een lapnaad genoemd. De materialen worden verbonden met een enkele pasbout, zoals afgebeeld in Figuur 12.



Figuur 12: Test op pasboutverbinding (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)

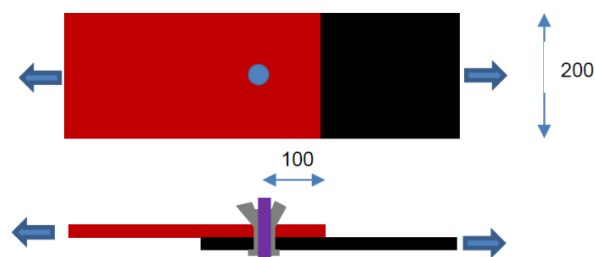
In de beproeving wordt op beide platen een trekkracht aangebracht totdat de verbinding bezwijkt. Zoals te zien in Figuur 13, is de faalmodus in de statische proef het falen van het biocomposiet in de netto doorsnede.



Figuur 13: Faalmodus pasboutverbinding (Claassen, 2019)

#### 3.1.2 Holloboltverbinding (biocomposiet – metalen onderdeel)

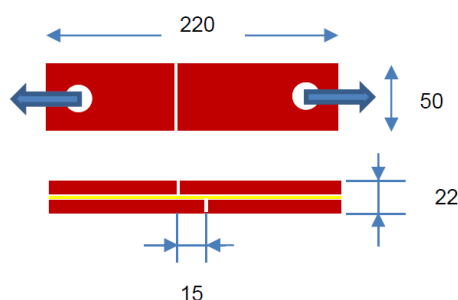
De holloboltverbinding wordt toegepast wanneer slechts één zijde van de verbinding toegankelijk is. De uitvoering van de test is gelijkaardig aan deze van de pasboutverbinding en is weergegeven in Figuur 14. Deze verbinding wordt gebruikt voor krachten zowel in het vlak als uit het vlak.



**Figuur 14: Test op holloboltverbinding (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)**

### 3.1.3 Lijmverbinding (biocomposiet – biocomposiet)

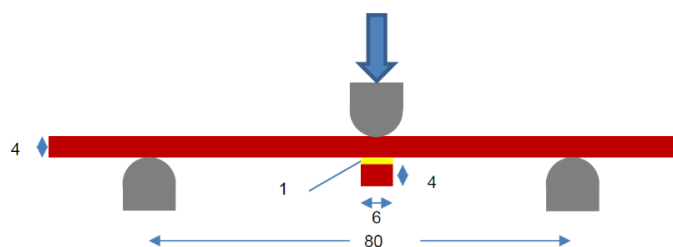
De lijmsorten die getest worden zijn een standaard vinylesterlijm en een lijm op basis van biogebaseerde epoxy om zodoende de bio-content van de gehele brug te verhogen. De sterkte van lijmverbindingen kan met drie verschillende methodes getest worden. In de eerste methode wordt een lapnaad zoals geïllustreerd in Figuur 15 getest.



**Figuur 15: Test op lijmverbinding met lapnaad (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)**

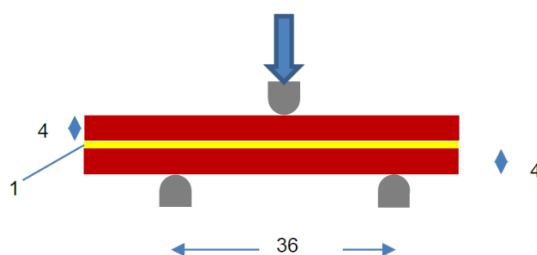
De lijmverbinding met lapnaad blijkt echter moeilijk te realiseren. Het versnijden van de laminaten tot proefstukken van de opgelegde afmetingen volgens de normeringen verloopt lastiger dan bij glasvezelcomposieten. Omwille hiervan wordt deze proef niet op grote schaal gebruikt om lijmsterktes te bepalen.

Een praktischere methode is de driepuntsbuigproef op een laminaat met een lokale aangelijmde verdikking, zoals geïllustreerd in Figuur 16. Tijdens de proef wordt een buigspanning via de lijm geïntroduceerd in het aangelijmde laminaat, waarbij op basis van eindige-elementenanalyse wordt aangenomen dat dit element over 40% van de hoogte meewerkt in buiging. Ten gevolge van deze buigspanningen ontstaan ook schuifspanningen in het materiaal die het inwendige horizontale krachterevenwicht garanderen. Ter hoogte van de lijmverbinding worden deze schuifspanningen opgenomen door de lijm. Het aangelijmde laminaat is vrij kort, omdat de lijmspanning dan als gelijkmatig verdeeld mag beschouwd worden. Uit de aangebrachte kracht op het moment van bezwijken kan de corresponderende schuifspanning in de lijm begroot worden (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017) (LS-Engineering, 2020).



**Figuur 16: Test op lijmverbinding met driepuntsbuigproef met lokale verdikking (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)**

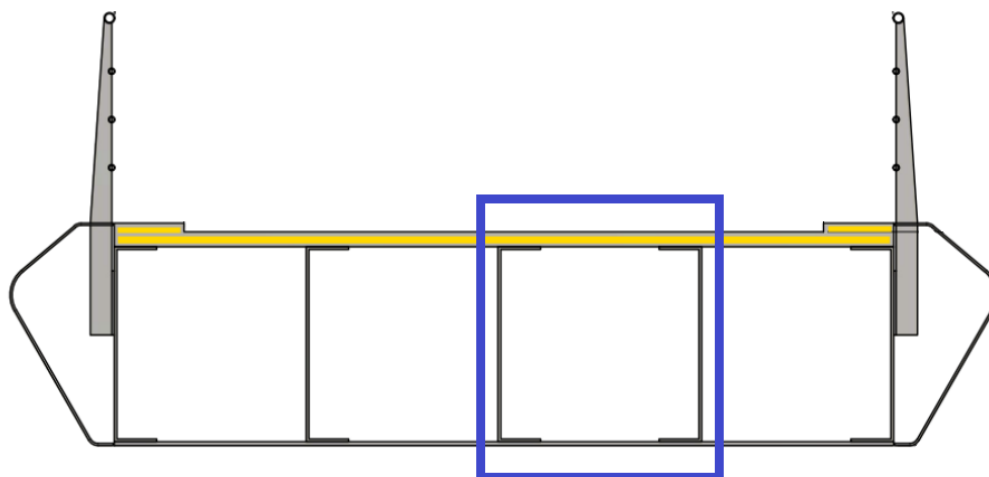
Ten slotte kan ook een ILSS-test uitgevoerd worden op twee aan elkaar gelijmde laminaten, zoals afgebeeld in Figuur 17.



Figuur 17: ILSS-test op lijmverbinding (Souren, Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen, 2017)

### 3.2 Full-scale brugdeel test

Op basis van het voorontwerp van de brug wordt een full-scale model van een deel van de doorsnede gemaakt om proeven op uit te voeren. Het voorontwerp is afgebeeld in Figuur 18. Aangezien de stijfheid bij biocomposieten lager is dan bij glasvezelcomposieten en de stijfheid bij composietbruggen veelal bepalender is dan de sterkte, wordt een relatief lage slankheid van hoogstens 20 gebruikt in het voorontwerp om te voldoen aan de doorbuigingseis, waarbij de slankheid gedefinieerd wordt als de verhouding van de overspanning tot de hoogte van de brug. In het definitieve ontwerp wordt de maximale slankheid tot 18,3 gereduceerd. In Figuur 19 wordt het full-scale model afgebeeld.



Figuur 18: Voorontwerp dwarsdoorsnede met aanduiding full-scale model (Claassen, 2019)



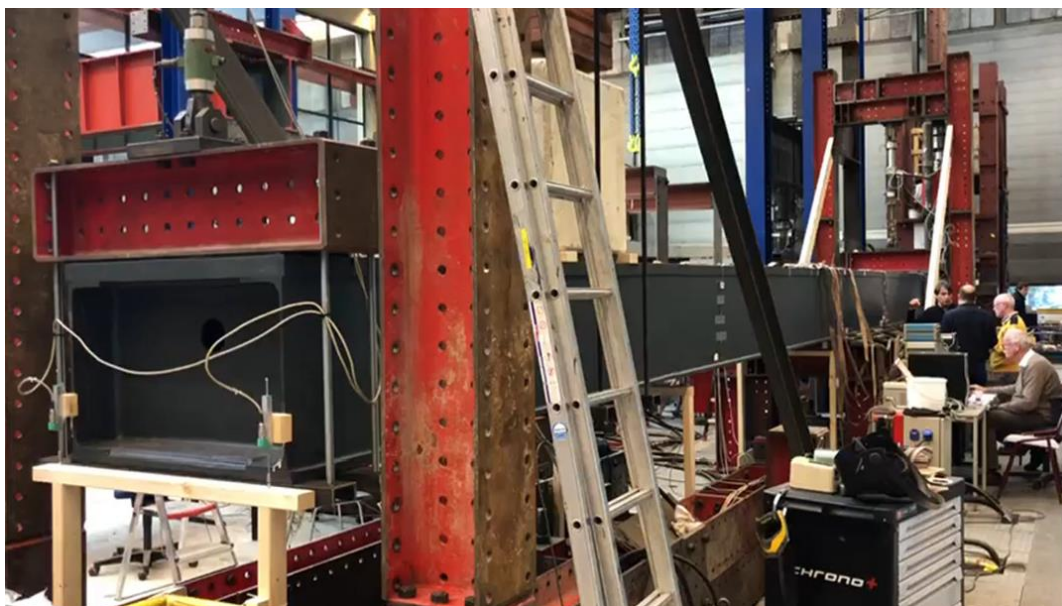
**Figuur 19: Full-scale model (Claassen, 2019)**

Het full-scale model wordt beproefd op kruip en vermoeiing. Figuur 20 toont de kruipproef, waarin betonnen blokken worden aangebracht als belasting.



**Figuur 20: Kruipproef (Claassen, 2019)**

De installatie waarmee de vermoeiingsbelasting wordt aangebracht op het model is weergegeven in Figuur 21.

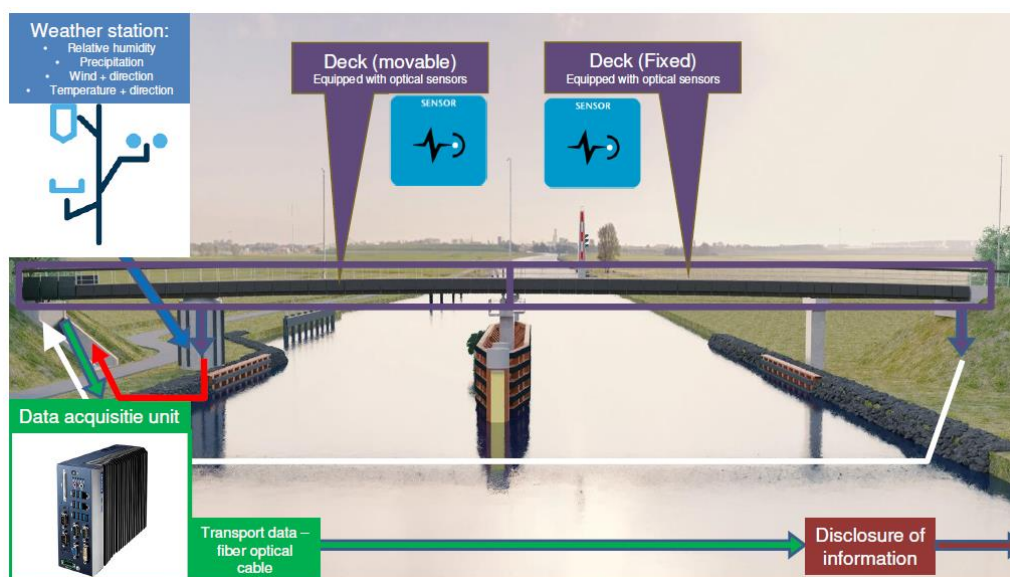


Figuur 21: Vermoeingsproef op full-scale model (Claassen, 2019)

In deze proef worden de belastingscycli ten gevolge van het open- en dichtgaan van het beweegbare gedeelte gesimuleerd voor een periode van 100 jaar, wat neerkomt op ruim 1 miljoen cycli. Het model kan dit aan zonder enige schade. Gedetailleerde resultaten van deze vermoeingsproeven zijn beschikbaar in (Pavlović, 2019).

### 3.3 Monitoring

Een uitgebreid monitoringprogramma dient informatie te verschaffen over de evolutie in de tijd van de vervorming, eigenfrequentie, demping en rekken. Deze kennis kan naar toekomstige projecten toe gebruikt worden, maar beoogt ook een doeltreffend onderhoudsprogramma. Ruim 200 Fiber Bragg grating-sensoren (FBG) worden aangebracht op de brug. Omgevingscondities waaronder temperatuur, relatieve vochtigheid, regenval en windsnelheid en -richting worden opgemeten in een weerstation zodat het gedrag van de brug hieraan gekoppeld kan worden. De verworven gegevens worden verzameld in een data acquisition unit, waarna ze via een kabel verder worden verspreid. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 22. De opgemeten gegevens kunnen live opgevolgd worden via de interactieve webpagina op volgende link: [www.biobasedbrug-ritsumasy.nl](http://www.biobasedbrug-ritsumasy.nl).



Figuur 22: Monitoringprogramma (Claassen, 2019)



Naast continue opmeting van gegevens kunnen op regelmatige tijdstippen ook doelgerichte niet-destructieve testen uitgevoerd worden om bepaalde eigenschappen te controleren. Enkele niet-destructieve testen worden hieronder beschreven:

- De eigenfrequentie wordt na verloop van tijd bepaald door een zak zand te laten vallen op specifieke posities op de brug en de verticale versnelling als functie van tijd op te meten en te analyseren (Souren, Bio-based brug Ritsumasyll - materialen, productieproces, testen, 2017).
- Via eenvoudige visuele inspectie kan gelet worden op oneffen kleuren, zichtbare scheuren, het plaatselijk ontbreken van de coating, vuilophoping, organische groei, aanwijzingen van waterschade, etc. (Claassen, 2019).
- Met een opwarmingssysteem in combinatie met infraroodcamera's kunnen onthechte zones in het composiet gelokaliseerd worden. Een digital tap hammer detecteert delaminaties en onthechtingen (Claassen, 2019).
- Fibre optic sensors meten de vervormingen en spanningen, waarna deze vergeleken worden met referentiewaarden (Claassen, 2019).

## 4 LEVENSCYCLUSANALYSE (LCA)

In sectie 4.1 worden twee LCA-studies van de biocomposietbrug in Ritsumasyll besproken. Los daarvan wordt in sectie 4.2 ook gekeken naar de prestaties van niet-biogebaseerde composietbruggen in LCA-studies. Daartoe wordt beroep gedaan op meerdere publicaties over dergelijke LCA-studies, waarin vaak meteen de vergelijking wordt gemaakt met conventionele bouwmaterialen zoals staal en beton. Op het Web of Science is ten tijde van deze publicatie slechts één paper over het onderwerp beschikbaar die niet ouder is dan vijf jaar.

### 4.1 LCA-studies Ritsumasyll

#### 4.1.1 Circulariteitsscan (Acker, 2019)

Het project rond de biocomposietbrug in Ritsumasyll kadert in de bredere ambitie van de Nederlandse provincie Fryslân om voorloper te zijn in het concept circulariteit. Om de circulariteit van de brug meetbaar, bespreekbaar en vergelijkbaar te maken is daarom een softwaretool ontwikkeld door Witteveen+Bos die a.d.h.v. een 'material circularity index' (MCI) een beoordeling maakt op gebied van het materiaalgebruik, het gebruik van niet-primaire bronnen en de mate van hergebruik aan het einde van de functionele levensduur. De tool werd naast de definitieve biocomposietbrug ter vergelijking ook toegepast op een schetsontwerp van een basculebrug dat aan het begin van de project als één van de mogelijke alternatieven opgesteld werd. De volledige analyse en conclusies zijn terug te vinden in (Acker, 2019).

De biocomposietbrug behaalt een betere MCI dan de basculebrug op elk van de drie voornoemde aspecten van circulariteit waarvan de tool een beoordeling maakt. Het lage gewicht van de biocomposietbrug heeft als rechtstreeks gevolg dat er minder materiaalverbruik is. De centrale doelstelling van het project, om zoveel mogelijk beroep te doen op biologische hernieuwbare materialen, alsook het gebruik van hergebruikte of gerecycleerde bronnen zorgt ervoor dat de brug ook op het tweede aspect beter scoort. Het aandeel van onderdelen die ontworpen zijn om hergebruikt te worden aan het einde van de levensduur is groter dan bij de basculebrug, waardoor ook het derde aspect gunstiger beoordeeld wordt.

Uit de beoordeling werd daarnaast kennis opgedaan over opportuniteiten om in de toekomst nog beter te doen. De analyse wees uit dat 98% van het materiaalgebruik tot de onderbouw behoort, wat nog meer is dan bij bruggen uit conventionele materialen. De onderbouw leent zich er daarom toe om de circulariteit te verhogen door minder materiaal te gebruiken, meer beroep te doen op gerecycleerde en hernieuwbare materialen en de mogelijkheid tot demontage te voorzien. Om dit te

faciliteren, wordt aangeraden om reeds vooraf een materialenpaspoort en demontagehandleiding op te stellen. Daarnaast kan voor nieuwe bruggen ingezet worden op uniformering en standaardisering van de onderbouw. In geval van bestaande bruggen die aan vervanging toe zijn, kan getracht worden de bestaande onderbouw te hergebruiken om zo de levensduur ervan te verlengen.

De circulariteitsbeoordeling voor dit project werd pas uitgevoerd wanneer het definitieve ontwerp reeds afgewerkt was, waardoor het niet meer mogelijk was het ontwerp bij te sturen op basis van de verworven inzichten. Daarom wordt voor toekomstige projecten aangeraden om in elke ontwerpfase een beoordeling op circulariteit uit te voeren en de tussentijdse conclusies telkens mee te nemen naar de volgende fase.

#### 4.1.2 Duurzaamheidsscan (Verstege, 2020)

Als reactie op de belangstelling van de bouwsector voor de opgedane kennis in het project, werd een tweede studie uitgevoerd waarin het toegepaste vlasvezelcomposiet wordt vergeleken met glasvezelcomposiet, staal, beton en hout. Voor elk van de materialen werd een voorontwerp opgesteld. In deze studie werd enkel het brugdek van het vaste deel van de brug beschouwd. Dezelfde onderbouw wordt opgenomen in elk voorontwerp omdat hiervoor vooral de belastingen door aanvaring en aanrijding bepalend zijn, eerder dan de vaste lasten van de bovenbouw.

In deze studie worden vier duurzaamheidsparameters bekeken: de milieukostenindicator (MKI), de uitstoot van CO<sub>2</sub>-equivalent, de mogelijkheid tot hergebruik en de levenscycluskosten. De milieukosten zijn veruit het hoogst voor de glasvezelcomposieten met de vlasvezelcomposieten op de tweede plaats. Dit is hoofdzakelijk te wijten aan de levenseindefase, met name omdat de gehanteerde methode van de studie geen enkele vorm van recyclage mogelijk acht voor beide composietmaterialen. Omwille van diezelfde reden scoren beide composieten het slechtst op vlak van hergebruik. Beton en staal behalen ruimschoots de beste resultaten, maar belangrijk hierbij is het waardeverlies van beton na recyclage dat niet werd meegenomen in de analyse. Voor het vlasvezelcomposiet wordt hoogwaardige recyclage wel mogelijk zodra het materiaal 100% biogebaseerd kan gemaakt worden.

De equivalente CO<sub>2</sub>-uitstoot ligt het hoogst voor de glasvezelcomposieten variant en het laagst voor het dek uit vlasvezelcomposiet. De hoge uitstoot van glasvezelcomposiet ligt vooral bij de productie van de glasvezels en de polyesterhars zelf. Echter wordt bij alle materialen, behalve beton, vastgesteld dat de epoxy beschermlaag een aanzienlijk deel van de uitstoot voor zich neemt. Daarom wordt het advies gegeven verder onderzoek te doen naar duurzame alternatieven voor coatings.

Uit de levenscycluskostenanalyse (life cycle cost analysis of LCCA) komt de vlasvezelcomposieten variant als minst gunstig naar voren. Omdat vlasvezel in deze toepassing nog uiterst nieuw is, wordt echter verwacht dat de kosten nog sterk gereduceerd kunnen worden. De andere vier materialen komen uit op een gelijkaardige kost, met staal als de meest economische optie.

De gunstige resultaten van de betonnen variant worden genuanceerd door het vermoeden dat de onderbouw in werkelijkheid toch zwaarder uitgevoerd zou moeten worden door het uitgesproken grotere eigengewicht van de bovenbouw, waardoor de prestaties van beton in deze studie mogelijk te optimistisch zijn. De MCI van de verschillende materialen werd, in tegenstelling tot de eerder uitgevoerde circulariteitsscan, voor deze studie niet berekend omdat ze steunt op een niet-erkende bepalingmethode en voor verschillende zaken afhangt van de beoordeling van de uitvoerder. De analyses die in plaats daarvan werden gemaakt berusten wel op erkende methodes. De resultaten zijn uitgebreid beschikbaar in (Verstege, 2020).

#### 4.1.3 Vergelijking circulariteitsscan en duurzaamheidsscan

In de circulariteitsscan behaalde de biocomposietbrug een goede score voor elk van de drie aspecten van circulariteit in vergelijking met de basculebrug. In de duurzaamheidsscan bleek daarentegen dat het biocomposiet slechter scoort op vlak van milieukosten, mogelijkheid tot hergebruik en

levenscycluskosten. Deze tegenstrijdigheid valt enerzijds te verklaren door de verschillende omstandigheden en aannames van de studies. In de circulariteitsscan werd de volledige brug beschouwd, terwijl de duurzaamheidsscan slechts het dek van het vaste bruggedeelte beschouwde met steeds dezelfde onderbouw. In de duurzaamheidsscan werd geen rekening gehouden met de kwaliteitsafname die gepaard gaat met de recyclage van beton en evenmin met de geanticipeerde verbetering van verwerkingsmethoden van biocomposieten in de toekomst. Omwille van deze redenen is de duurzaamheidsscan vrij streng ten opzichte van het biocomposiet en mogelijk te mild voor de betonnen variant. Daarnaast zijn de gehanteerde methodes van beide studies ook verschillend en bevatte de gehanteerde database van milieueffecten in de duurzaamheidsscan nog geen gegevens over biocomposieten, waardoor deze extern dienden geraadpleegd te worden.

## 4.2 LCA-studies composietbruggen

### 4.2.1 Belangrijkste conclusies uit vergelijkende studies in de literatuur

In Nederland werden door de BECO Groep twee onderzoeken gedaan in 2009 en 2013 in samenwerking met de composietsector, betonsector, staalsector en houtsector, alsook onafhankelijke experts om een zo objectief mogelijke vergelijking tussen de bouwmaterialen mogelijk te maken (Diana de Graaf, 2009) (Sander Hegger, 2013). De eerste studie wees uit dat composieten met glasvezels een aanzienlijk lagere milieu-impact, energie-inhoud en carbon footprint hebben dan staal en beton. Composieten met koolstofvezels bleken een lagere milieu-impact, hogere energie-inhoud en lagere carbon footprint te hebben dan de andere materialen, hoewel de verschillen vrij klein waren. In deze studie werd een dubbele levensduur aangenomen voor de composietbruggen (Diana de Graaf, 2009). In de tweede studie werd een composietbrug vergeleken met varianten in beton, staal en hout met gelijke specificaties. In dit geval scoorde de composietbrug veel slechter, met een milieukostenindicator (MKI) die ruim dubbel zo hoog lag als bij de andere materialen. Hierbij werd opgemerkt dat de definiëring van de specificaties een grote invloed heeft op de te verwachten resultaten, wat een eerlijke vergelijking bemoeilijkt. Een specificatie die voor het ene materiaal makkelijk te behalen is, vormt voor een ander materiaal mogelijk een zware eis, en vice versa. De herbruikbaarheid of hoogwaardige recyclage van composieten componenten werd in deze studie niet ingerekend (Sander Hegger, 2013).

Een studie uit 2010 besloot dat composieten bruggen gunstiger zijn dan staal en beton op vlak van energieverbruik en watervervuiling, maar op vlak van luchtvervuiling op de tweede plaats komen na staal. Qua milieu-impact in het algemeen genieten composieten de voorkeur. Daartegenover staat dat de bouwkost hoger ligt, echter slechts in beperkte mate (Daniel, 2010).

In 2014 werd door de Chalmers University een paper gepubliceerd over composieten als duurzaam alternatief voor brugdekken. Hierin wordt een bestaande brug uit staal en beton beschouwd waarvan ofwel het betonnen dek vervangen wordt door een composieten dek, ofwel de volledige bovenbouw van de brug vervangen wordt zonder gebruik van composieten. De studie concludeerde dat het composieten dek over de volledige levensduur leidt tot een kostenbesparing en een verminderde CO<sub>2</sub>-uitstoot. Andere milieueffecten werden niet beschouwd. De kostenbesparing is des te hoger wanneer de brug grote verkeersstromen bewerkstelligt omdat de lagere nood aan onderhoud bij composieten leidt tot minder verkeersverstoringen (Valbona Mara, 2014).

Een masterproef uit 2015 aan de Universiteit Twente richtte zich voornamelijk op de kosten doorheen de levensduur, maar nam daarbij de kosten die gepaard gaan met de effecten op het milieu wel in rekening. De studie concludeerde dat composieten slechts competitief kunnen worden met beton voor overspanningen kleiner dan 15 m en lange levensduren, wanneer bovendien de onrechtstreekse gebruikerskosten door verkeersomleidingen door onderhoudswerken in rekening gebracht worden. De kosten geassocieerd met milieueffecten bleken dermate laag dat aangeraden werd de impact op het milieu afzonderlijk te beschouwen (Bosman J. , FRP road bridges as a concrete alternative, 2015).



In een andere masterproef uit 2018 aan de Chalmers University werd een levenscycluskostenanalyse uitgevoerd waaruit bleek dat staal en beton een lagere kost hebben over de totale levensduur. Ook hier werd bemerkt dat de bouwkost bij composieten hoger ligt maar de onderhoudskost lager ligt (Patljak, 2018).

Uit een analyse uit 2019 van Rijkswaterstaat i.s.m. CompositesNL bleek dat composieten brugdekken duidelijk slechter scoorden dan betonnen varianten. Wanneer bij vervangingswerken de bestaande onderbouw hergebruikt wordt, is het composieten dek wel gunstiger (Rijkswaterstaat, 2019).

Het Spaanse bedrijf ACCIONA Construction publiceerde in 2019 een paper over hun ervaringen met composieten, waaronder een vergelijkende LCA-studie van een composieten en een betonnen brug. Daarin wordt gerapporteerd dat composieten beter scoren op vlak van waterverbruik en humane toxiciteit, maar slechter scoren op vlak van klimaatverandering en omgevingsvervuiling met negatieve gevolgen op de volksgezondheid. Op andere aspecten werden geen grote verschillen waargenomen. Over de volledige levensduur is de composieten brug gunstiger uitgevallen dan de betonnen variant (M.M. Pintor-Escobar, 2019).

#### 4.2.2 Algemene conclusies: verschillen en gelijkenissen tussen studies

In meerdere studies is naar voren gekomen dat composieten voornamelijk slecht scoren op gebied van klimaatverandering en humane toxiciteit, met name bij de productie van de materialen (Sander Hegger, 2013) (M.M. Pintor-Escobar, 2019) (Valbona Mara, 2014) (Rijkswaterstaat, 2019). Door de goede chemische stabiliteit van composietmaterialen zijn de kosten en milieueffecten ten gevolge van onderhoudswerken zeer beperkt bij composieten (Patljak, 2018) (Bosman J. , FRP road bridges as a concrete alternative, 2015) (Valbona Mara, 2014). Volgens de beschouwde studies gaat de constructie van een composietbrug echter wel gepaard met een hogere initiële kost (Patljak, 2018) (Bosman J. , FRP road bridges as a concrete alternative, 2015) (Daniel, 2010).

De conclusies over de milieuprestaties van composieten in de uitgevoerde LCA-studies ten opzichte van traditionele bouwmaterialen liggen echter ver uiteen en zijn vaak tegenstrijdig tussen de verschillende publicaties onderling. In enkele studies komen composietmaterialen eruit als minst milieubelastend en meest kosteneffectief, terwijl dit in andere publicaties net andersom is. Deze tegenstrijdigheden worden echter door tal van de publicaties zelf geanticipeerd en hun oorzaken worden reeds geïmpliceerd.

In enkele van de publicaties wordt nadruk gelegd op de beperkte toepasbaarheid van de eigen conclusies op andere bruggen vanwege de grote invloed van de projectgebonden context op de resultaten. Bijgevolg kunnen geen algemene conclusies getrokken worden en moet in de huidige stand van zaken elke case afzonderlijk beschouwd worden (Sander Hegger, 2013) (Bosman J. , FRP road bridges as a concrete alternative, 2015) (Valbona Mara, 2014) (Daniel, 2010). Daarnaast geven meerdere publicaties aan dat de resultaten in grote mate bepaald worden door de beschikbare data over de milieu-impact van vezelmaterialen, die nog vaak onbetrouwbaar of onvolledig is en meer onderzoek vergt (Diana de Graaf, 2009) (Sander Hegger, 2013) (Rijkswaterstaat, 2019) (Valbona Mara, 2014). Over de verwerking of het hergebruik van de materialen aan het einde van de levensduur bestaat eveneens nog veel onzekerheid door het gebrek aan ervaring omdat composietbruggen relatief nieuw zijn. Daarbij aansluitend bestaat bij meerdere auteurs het vermoeden dat in de levensduurfase nog veel ruimte voor verbetering is in vergelijking met beton en staal, waar dit al meer op punt staat (Diana de Graaf, 2009) (Sander Hegger, 2013) (Rijkswaterstaat, 2019) (Patljak, 2018) (M.M. Pintor-Escobar, 2019).

De adviezen naar toekomstige projecten toe zijn vaak gelijklopend. Onder meer het inzetten van innovatieve grondstoffen met een lagere milieu-impact, zoals de biogebaseerde vezels en harsen in de brug van Ritsumasyl, wordt aanzien als een significante opportuniteit tot verbetering (Diana de Graaf, 2009) (Sander Hegger, 2013) (Rijkswaterstaat, 2019). Eén van de sterktes van composieten is de lange levensduur met weinig nood aan onderhoud. Wanneer dit ten volle benut wordt door componenten

te hergebruiken, wordt de milieu-impact aanzienlijk kleiner. Het opleggen van verschillende specificaties omtrent de vooropgestelde levensduur tussen verschillende studies is immers een belangrijke oorzaak van de uiteenlopende resultaten (Diana de Graaf, 2009) (Sander Hegger, 2013) (Rijkswaterstaat, 2019) (M.M. Pintor-Escobar, 2019) (Bosman J. , FRP road bridges as a concrete alternative, 2015). Verder wordt geadviseerd om de productietechnieken van composieten te optimaliseren (M.M. Pintor-Escobar, 2019).

## 5 STRUCTURELE SAMENWERKING COMPOSITET MET ANDERE MATERIALEN

Informatie over de structurele samenwerking van composietmaterialen met andere materialen is te raadplegen in (Pavlović, 2019). Hierin komen onder meer proeven en eindige-elementenanalyses op verbindingen tussen composietmaterialen en stalen elementen aan bod.

## 6 CONCLUSIE

Ten gevolge van de onzekerheden in theoretische berekeningsmodellen en de beperkte hoeveelheid aan bestaand onderzoek in het domein van biocomposieten in brugtoepassingen, is het voorafgaand uitgebreid testen van materialen en brugcomponenten essentieel. Uit het theoretische en voornamelijk experimentele onderzoek in het kader van het project rond de fiets- en voetgangersbrug in Ritsumasyt is gebleken dat vlasvezel in combinatie met een bio-epoxy de meest geschikte combinatie is in de beschouwde context. Hierbij werd echter naast louter materiaaleigenschappen ook rekening gehouden met het bestaande aanbod van verkrijgbare producten en de daaraan gekoppelde kostprijs, kwaliteitscontinuïteit en beschikbaarheid op grote schaal. Omwille van het plaats- en tijdsgebonden karakter hiervan, dient dit ook in acht genomen te worden in toekomstige projecten.

Het bestuderen en beproeven van biocomposietmaterialen gebeurde in meerdere fases. Eerst werden de meest geschikte vezel- en harsproducten geselecteerd om te verwerken tot verschillende combinaties van biocomposieten waarop screeningstesten uitgevoerd werden om de slechtst presterende combinaties te elimineren. De overblijvende materialen werden uitgebreider getest om tot ontwerpeigenschappen te komen en een optimaal biocomposiet te selecteren. Nadien werden modellen beproefd van componenten of volledige delen van een eerste ontwerp van de brug, zowel op schaal als op ware grootte. Op basis van deze testen werd het ontwerp verder geoptimaliseerd. Belangrijke conclusies uit de proeven zijn de grote kruipvorming waardoor voorkruipen noodzakelijk is, en het uitblijven van enige schade ten gevolge van vermoeiing nadat 100 jaar aan mechanische open- en sluitbewegingen van het beweegbare deel van de brug gesimuleerd werden.

Uit de circulariteitsstudie van de brug is gebleken dat de brug beter scoort op alle aspecten van circulariteit. Omwille van het hoge aandeel van het materiaalgebruik dat naar de onderbouw gaat, liggen hier de belangrijkste opportuniteiten om de prestaties van toekomstige projecten nog te verbeteren. De literatuur over levenscyclusanalyses van composietbruggen in het algemeen levert vergelijkingen met conventionele bouwmaterialen die vaak tegenstrijdig zijn. Dit valt voornamelijk te wijten aan de onzekerheid over de milieu-impact van vezelversterkte bouwmaterialen en aan de grote afhankelijkheid van situatiegebonden omstandigheden. Bijgevolg kunnen slechts in beperkte mate conclusies getrokken worden over de prestaties van composietbruggen in LCA-studies in verhouding met conventionele bouwmaterialen.

## 7 REFERENTIES

- Acker, J. v. (2019). *Circulair ontwerp scan biobased brug Ritsumasyt*. SWECO, Witteveen+Bos.
- Bosman, J. (2015). *FRP road bridges as a concrete alternative*. University of Twente.
- Bosman, J. (n.d.). *FRP road bridges as a concrete alternative*.
- Bosman, P. (2018). *ILSS hot wet frost (O6) - Internal test report*.

- Bosman, P. (2018). *ILSS screening (O1) - Internal test report*.
- Claassen, W. (2019, April). Making advanced Materials More Sustainable - The Advent of Bio Composite Bridges.
- CROW-CUR. (2019). Aanbevelingen 96:2019 Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies.
- Daniel, R. A. (2010). A Composite Bridge is Favoured by Quantifying Ecological Impact. *Structural Engineering International*, 385-391.
- Deng, Y. (2014). Life cycle assessment of biobased fibre-reinforced polymer composites. Leuven: KU Leuven.
- Diana de Graaf, L. v. (2009). *LCA composietbrug: Eindrapport (2e versie)*. Rotterdam: BECO Groep.
- LS-Engineering. (2020, March 13). *Lijm testresultaten met vlasepoxy*.
- M.M. Pintor-Escobar, E. G.-B. (2019). LCA of civil engineering infrastructures in composite materials - ACCIONA Construction's experience. *Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision*.
- Patljak, I. (2018). Life cycle cost analysis of FRP pedestrian bridges. Chalmers University.
- Pavlović, M. (2019, December 13). Onderzoek naar de materiaaleigenschappen van (bio-)composiet en de verbinding met andere materialen. Ghent, Belgium.
- Rijkswaterstaat, C. (2019). *Samenvatting analyse duurzaamheid/circulariteit vezelversterkte brugdekken*. Amsterdam: Rijkswaterstaat, CompositesNL.
- Sander Hegger, D. d. (2013). *Vergelijkende LCA studie bruggen*. Rotterdam: BECO Groep.
- Souren, W. (2017). *Bio-based brug Ritsumasyl - materialen, productieproces, testen*. Lightweight Structures B.V.
- Souren, W. (2017). *Bio-based brug Ritsumasyl: SVO Constructief Ontwerp*. Lightweight Structures B.V.
- Souren, W. (2017). *Bio-based brug Ritsumasyl: VO Constructief Ontwerp*. Lightweight Structures B.V.
- Valbona Mara, R. H. (2014). Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A sustainable solution. *Construction and Building Materials*, vol. 50, 190-199.
- Verstege, L. (2020, January 14). *Duurzaamheidsscan biocomposiet fietsbrug Ritsumasyl*.
- Waas, A. M. (1999). Compressive response and failure of fiber reinforced unidirectional composites. *International Journal of Fracture*.
- Willem Souren, E. V. (2019). *Bio-based brug Ritsumasyl: DO Constructief Ontwerp*. Lightweight Structures B.V.