

EERSTE BIO-BASED VVK BEWEEGBARE FIETSBRUG

Wouter Claassen | Witteveen+Bos, Deventer

Georgios Zarifis | Witteveen+Bos, Rotterdam



De klimaatambities van de Nederlandse overheid, en haar standpunt over thema's als circulariteit en duurzaamheid, hebben een belangrijke rol gespeeld bij de overstap naar alternatieve materialen



In 2016 stond de ontwerpaanpak voor het bouwen van een beweegbare fietsbrug van biobased composiet in een artikel voor het 19e IABSE-congres in Stockholm. [1]

Het doel van het project was om aan te tonen dat het mogelijk is om een beweegbare brug te bouwen met een technische levensduur van 100 jaar met gebruik van natuurlijke vezels. Op dat moment was een overspanning van 17 m voorzien. Nog geen vier jaar later is het definitieve ontwerp gebouwd, met een biobased dek van 66 m. Dit artikel beschrijft in het kort de ontwerpuitdagingen, die het projectteam moesten overwinnen om zijn taak te volbrengen. Dit artikel beschrijft het volledige verhaal, maar gaat niet in op alle details.

De resultaten met alle achtergrondinformatie kunnen worden gedownload van de website [https://www.drive.fr/ \[2,3\]](https://www.drive.fr/ [2,3]).

ACHTERGRONDINFORMATIE

De klimaatambities van de Nederlandse overheid, en haar standpunt over thema's als circulariteit en duurzaamheid, hebben een belangrijke rol gespeeld bij de overstap naar alternatieve materialen, zoals biobased composieten. In dit project is het projectteam erin geslaagd om de eerste beweegbare biobased composiet fietsbrug ter wereld te bouwen met vlasvezels, balsahout en een biobased hars. In opdracht van de Provincie Fryslân is het architectonisch ontwerp gemaakt door Quist Wintermans Architecten en uitgewerkt door een ontwerpteam bestaande uit ingenieursbureaus Sweco/ Witteveen+Bos en voor de biobased

composiet dekconstructie Delft Infra Composites. SPIE en Antea hebben het elektrisch-mechanische en civieltechnische deel van het werk gerealiseerd en Strukton/ SPIE was de aangewezen hoofdaannemer. In samenwerking met universiteiten, onderzoeksinstituten en leveranciers zijn testen en ontwerpen van componenten en materialen uitgevoerd. Deze brug zal een nieuwe maatstaf vormen voor een duurzamer gebouwde omgeving. De brug heeft een totale lengte van 66 meter. De eerste helft is vast en de tweede bestaat uit een asymmetrische draaibrug met een vrije hoofdoverspanning van 22 m en een ballastgedeelte van 12 m.

1 Voor een fietsbrug is het dynamische gedrag een belangrijk ontwerpcriterium. [11]

Het brugdek is gemaakt van 85% biobased materiaal.

De Ritsumasylbrug, gelegen in de provincie Fryslân, steekt het Van Harinxmakanaal over en vervangt een oude basculebrug waarvan de kelder met het contragewicht zich in het midden van het kanaal bevindt. In de vroege ontwerpfase van het project, waarin werd gekeken naar de mogelijkheden en beperkingen van het toepassen van biobased VVK, koos het team ervoor om de basculebrug te vervangen door een asymmetrische draaibrug. Door deze grote verandering kon er tenminste één remmingwerk worden bespaard, wat enkele tonnen staal, en dus geld, bespaarde. Deze besparingen zijn geïnvesteerd in het vergroten van de lengte van het biobased dek. In het oorspronkelijke ontwerp was alleen het beweegbare deel (toen 17 m) biobased gepland. Nu is de gehele 66 m van het dek biobased.

De brug werd vervaardigd m.b.v. vacuüminjectie met een volume van 50% Amplitex vlasvezels, (gemaakt door Bcomp®) en een Epoxyhars 1800 ECO + 1804 ECO (gemaakt door Resoltech. [3]) In het dek wordt een balsahouten kern van Baltek gebruikt voor de spreiding van de lokale belastingen. Het dek, liggers en bodemplaat van de koker zijn allemaal verbonden door hecht pasta. Om de brug te beschermen tegen omgevingsinvloeden, is de buitenkant gecoat omdat vlasvezels gevoelig zijn voor vocht.

De engineering is uitgevoerd door Delft Infra Composites, onder supervisie van Ingenieursbureaus Sweco/Witteveen+Bos. Eén van de bepalende ontwerpaspecten is het kruipgedrag van dit natuurlijke materiaal. Vooral in combinatie met een beweegbaar deel waren er veel uitdagingen bij het vinden van de juiste combinatie van maximaal toelaatbare doorbuiging en maximale capaciteit van het hefmechanisme. Het hefmechanisme zorgt ervoor dat het dek na elke opening goed in hoogte wordt uitgelijnd.

MATERIAALONDERZOEK

Het gebruik van natuurlijke vezels in combinatie met een biobased hars, is op deze schaal nog nooit eerder toegepast. Om er zeker van te zijn dat de brug goed is ontworpen voor een levensduur van 100 jaar,

is een groot aantal tests uitgevoerd, zie [2]. Deze testen zijn uitgevoerd door de NHL Stenden Hogeschool, de Hogeschool Windesheim, de Hochschule Osnabrück en de TUDelft. Eén van de eerste en belangrijkste uitgevoerde tests was de InterLaminar shear Strength (ILSS)-test, om de beste combinatie van natuurlijke vezels en hars te vinden. Niet alleen de uitkomst van de ILSS-testen, maar ook de beschikbaarheid en prijs van de grondstoffen zijn belangrijk. Gedurende dit project was de combinatie van Bcomp® vlasvezels en Resoltech Eco 1800 Epoxy het meest geschikt. Alle andere noodzakelijke tests werden uitgevoerd op deze combinatie van materialen, zie [2].

De volgende paragrafen gaan kort in op de belangrijkste ontwerpaspecten, zoals vocht, dat een negatief effect heeft op de sterkte en stijfheid van het composiet. De natuurlijke vezels zijn hydrofiel, waardoor ze vatbaar zijn voor waterabsorptie, wat een slechte hechting aan de hydrofobe polymeermatrix tot gevolg heeft. Het is daarom belangrijk te voorkomen dat vocht het laminaat binnendringt. Als oplossing wordt een zeer dicht coatingsysteem als beschermingslaag gebruikt.

Het effect van vocht is bepaald tijdens warmnat testen. Het effect op de elasticiteitsmodulus van een biocomposiet dat 100 uur onder water is blootgesteld aan een temperatuur van 30 °C, is bepaald voor drie verschillende coatingsystemen:

- het ongecoate biocomposiet, dat een reductie van 13% ondervond,
- het composiet met vinylestercoating ondervond een reductie van 4% en
- het biocomposiet met meerlaagse coating ondervond bijna geen reductie.

Als we deze resultaten vertalen naar een ontwerp levensduur van 100 jaar, is de karakteristieke waarde van de warmnatconversiefactor gelijk aan 0,97 (1/1,029). In de ontwerp berekeningen is een conservatieve conversiefactor van $\eta_{cm} = 0,83$ (1/1,2) gebruikt, zie [2, 3].

Vocht is overal. De door de leverancier opgegeven dichtheid van de vezels wordt altijd bepaald onder laboratoriumomstandigheden. Deze dichtheid wijkt af van de werkelijkheid omdat de vezels zeer snel vocht opnemen. Bij een normale relatieve

luchtvochtigheid in de fabriek kan de stijging van de dichtheid rond de 10% liggen. De energie die nodig is om al het vocht voor injectie uit de vezel te verwijderen, weegt niet op tegen de voordelen, en wordt daarom niet geadviseerd.

Traditioneel wordt de semi-empirische 'Halpin Tsai-vergelijking' gebruikt om de stijfheidseigenschappen voor Uni-Directioneel (UD) laminaat te bepalen:

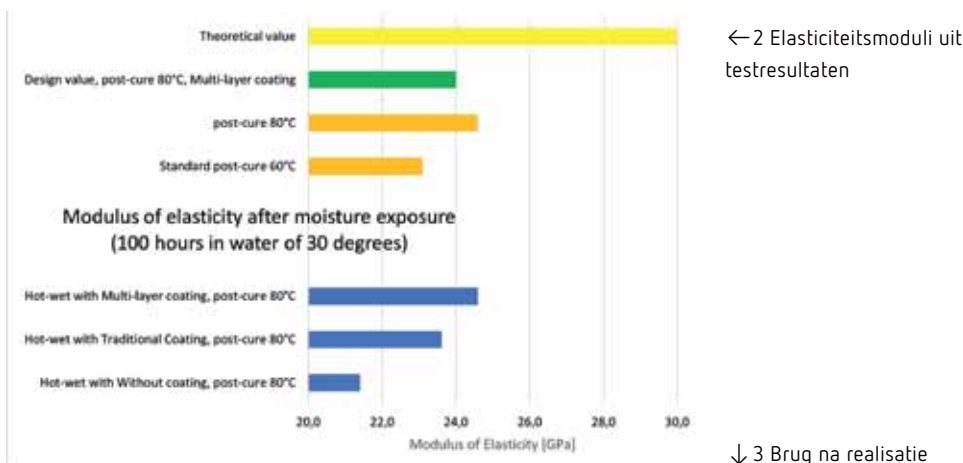
$$4 E_1 = [E_r + (E_f - E_r) \times V_f] \times f_{UD} \quad (1)$$

waarin:

- E_1 de modulus is van elasticiteit in de hoofdrichting van de vezels;
- E_r de elasticiteitsmodulus is van de hars;
- E_f de elasticiteitsmodulus is van vezels in de hoofdrichting van de vezels;
- V_f het vezelvolumegehalte is en
- f_{UD} een empirische reductiefactor is, gelijk aan 0,97.

De Bcomp-vlasvezels hebben een elasticiteitsmodulus van ongeveer 60 GPa. Bij het samenstellen van een laminaat met een vezelvolumegehalte van 50% onder vacuüm, ligt de elasticiteitsmodulus van een UD-laminaat rond de 30 GPa volgens vgl. (1). In werkelijkheid reageren biobased composieten anders, wat resulteert in een veel lagere elasticiteitsmodulus, zie [5, 6]. Dit bewijst dat het gebruik van vgl. (1) ongeschikt is zonder een passende correctiefactor voor natuurlijke vezels. De mengregel geeft alleen de ultieme maximale elasticiteitsmodulus, die in de praktijk 'nooit' zal worden bereikt. Een plausibele reden hiervoor is het niet-lineaire materiaalgedrag en het feit dat de amorfe microfibrillen zich onder opgelegde belasting tot een hogere mate van kristalliniteit moeten rangschikken. Daarom vertonen bijvoorbeeld de spanning-recurven van een biobased composiet meestal een iets hogere elasticiteitsmodulus, die vervolgens afvlakt tot een meer lineaire gradiënt. (zie Technisch rapport Structural Engineering International 2020) Gelukkig zijn er methoden gevonden om de elasticiteitsmodulus zo hoog mogelijk te maken:

- een langer vacuüminjectieproces toepassen om de natuurlijke vezels samen te laten drukken voordat de hars wordt geïnjecteerd;



← 2 Elasticiteitsmoduli uit testresultaten

↓ 3 Brug na realisatie



- een langere en meer uitgebreide naharding toepassen, waarbij de laminaten worden onderworpen aan een hogere temperatuur (80 °C) dan normaal (60 °C).

Voor biobased composieten dient de naharding beperkt te worden tot maximaal 100 °C om afbraak van de vezels te voorkomen. Figuur 2 toont de elasticiteitsmodulus van het materiaal op basis van de reducties gevonden uit de verschillende testresultaten. Voor de uiteindelijke berekeningen is gekozen voor een ontwerpwaarde van 24 GPa, met een naharding van 80 °C en een meerlaagse coating.

Naast vocht is kruip een zeer belangrijk aspect waarmee rekening moet worden gehouden in het ontwerp, omdat het leidt tot vermindering van sterkte en stijfheid. Op basis van trekruip-testresultaten voor een technische levensduur van 100 jaar, is een conversiefactor voor kruptreksterkte gevonden van $\eta_{cv} = 0,27$ (1/3,7) voor Quasi Isotrope (QI) laminaten en $\eta_{cv} = 0,30$ (1/3,3) voor een laminaat met een combinatie van QI- en UD-lagen, zie [2]. Vergeleken met een QI-glas-epoxy laag zou de kruipfactor $\eta_{cv} = 0,67$ (1/1,5) zijn. [7]

Kruipcompressietests zijn moeilijker uit te voeren, maar geven vergelijkbare resultaten. Opgemerkt moet worden dat de kruipfactor afhankelijk is van het spanningsniveau in het laminaat en daarom kan de vermelde waarde niet worden gekopieerd zonder de context te kennen. Vooral voor een beweegbare brug is kruip een zeer bepalende factor. Als het kruiseffect was genegeerd, had de doorbuiging aan de lange zijde bij het openen van de brug kunnen oplopen tot meer dan 0,5 m. Om een dergelijke doorbuiging tot een minimum te beperken, werd de brug onderworpen aan een pré-kruipfase. De pré-kruipdoorbuiging wordt uitgesloten van de totale resterende, verwachte vervorming. De laatste eigenschap die hier wordt besproken, is de thermische uitzettingscoëfficiënt van het biobased composiet in vergelijking met traditionele glasvezelcomposieten. Voor biobased composieten is een groot verschil gevonden tussen de uitzettingscoëfficiënt in de langs- (α_1) en dwarsrichting (α_2). Meer specifiek blijkt de laatste 10 keer hoger te zijn dan de eerste. Bovendien varieert de uitzettingscoëfficiënt afhankelijk van de temperatuur, terwijl deze voor de meeste materialen lineair is. Een mogelijke verklaring, die nog nader onderzocht moet worden, zou kunnen zijn

dat het vocht dat in de vezels aanwezig is, door absorptie uit de relatieve vochtigheid vóór vacuüminjectie de verandering in de uitzettingscoëfficiënt veroorzaakt. Afhankelijk van de temperatuur ondergaat dit vocht een transformatie van vast naar vloeibaar naar gas. Tot nu toe is de ervaring gebaseerd op coupontests.

Om ervoor te zorgen dat de uiteindelijke brug veilig genoeg is, is een maquette op ware grootte gebouwd met een lengte van 12 m, een breedte van 0,9 m en een hoogte van 0,6 m. Dit 'monster' is uitgebreid getest aan de TU-Delft en heeft sterkte-, kruip-, vermoeiings- en hot/wet-cyclustests ondergaan. De resultaten waren in lijn met de resultaten van de coupontests, waardoor het team groen licht kreeg om door te gaan met het bouwen van de echte brug. Vermoeiingstests toonden geen afname van de stijfheid na 1,15 miljoen cycli (simulatie van 100 jaar werking). [2]

HET ONTWERP

De informatie uit de coupontesten en de full-scale testen dienden als input voor de ontwerpfase van de brug. Op basis van de contractvoorwaarden moest de brug aan de volgende eisen voldoen, zie [3], zoals gedefinieerd in [8-10]:

- een technische levensduur van 100 jaar,
- gevolklasse: CC2,
- ontwerp levensduur klasse 3,
- 10.000 openingen per jaar,
- bestand tegen de volgende belastingen:
 - gelijkmatig verdeelde belasting $q_{fk} = 5$ kN/m²,
 - bedrijfswagenbelasting: 50 kN,
 - incidentele voertuigbelasting: 120 kN,
 - aanvaringsschip CEMT Va, waarbij lokale schade is toegestaan.

De dwarsdoorsnede van de brug heeft een breedte van 3,65 m en een hoogte van 1,2 m. Vijf liggers, een onderflens en een sandwich (balsa) bovendek vormen samen de kokervormige dwarsdoorsnede van de brug. In de volgende paragrafen worden twee belangrijke ontwerpaspecten kort toegelicht. Er wordt rekening gehouden met de eigenfrequenties in de open en gesloten posities. De laagste frequentie blijkt in de open stand op te treden (1,3 Hz). In de

gesloten stand is de laagste 2,2 Hz in horizontale richting en 4,6 Hz in verticale richting. Bij voetgangersbelasting is de eigenfrequentie hoog genoeg om ongewenste trillingen te voorkomen. Daarnaast hebben vlascomposieten een zeer hoge dempingscoëfficiënt. Voor de open stand onder windbelasting is de eigenfrequentie vrij laag. Daarom is in het ontwerp extra ruimte gereserveerd voor eventuele extra dempers. De praktijk zal uitwijzen of deze dempers nodig zijn. (Elasticiteitsmodulus onder verschillende omstandigheden) Tot dusver zijn er in *Structural Engineering International 2020 Technical Report 3* geen ongunstige trillingen waargenomen.

Een ander belangrijk ontwerpaspect is vermoeiingsschade aan het beweegbare deel, veroorzaakt door de openingscycli van de brug. Een aandachtspunt voor de vermoeiingsschade is de verbinding van de brug met de draaikrans op de draaias van de brug bij as 2. Deze verbinding is uitgevoerd met een tussenliggende, wigvormige plaat tussen de brug en de draaikrans, zie [3]. De verbinding van de wigplaat met de dwarslijven van de brug wordt uitgevoerd met behulp van verstijfde hoekklemmen en bouten. Vermoeidheid blijkt een kritieke factor te zijn en is aanwezig in de vorm van lagerspanning op het laminaat rond de bouten. De werkelijke vermoeiingsspanningsintervallen zijn afhankelijk van het tijd-/faseverschil van de hefmechanismen aan de twee uiteinden (as 1 en as 3, zie fig. 5) van de brug tijdens het openen en sluiten, maar ook van de doorbuiging van de brug in de open stand, die wordt beïnvloed door temperatuur en kruipontwikkeling in de tijd, zie [3].

Zoals beschreven in het materiaalonderzoek is kruip een heel belangrijk aspect in het ontwerpproces van een biobased brug. Volgens het contract moest de brug worden gebogen ($R = 1.000 \text{ m}$). De voorgewelfde vorm van de brugdekken is verkregen tijdens het zogenaamde 'pre-creep-proces'. Door dit proces werd niet alleen de gewenste voorgevormde vorm bereikt, maar werd ook het grootste effect van de initiële kruip op de tussensteun van beide dekken aanzienlijk verminderd, zie . [3].

MONITORINGSYSTEEM - BESCHRIJVING EN DOEL

- Het monitoringsysteem geeft waardevol inzicht in de respons van het systeem en de materialen. Het onderhoudsteam van de provincie Fryslân zal het monitoringsysteem gebruiken om zowel regulier onderhoud als aanvullend onderhoud uit te voeren, mocht dit door het systeem worden aangegeven. Een ander innovatief aspect is het feit dat data zijn ontsloten en gedeeld met onderwijsinstellingen, asset owners van overheden en materiaalexperts. Op deze manier levert het project waardevolle informatie op over biobased composieten als toekomstbestendig bouw materiaal voor infrastructuur voor een langere periode. De hardware van het monitoringsysteem bestaat uit twee hoofdonderdelen, geïnstalleerd door twee verschillende partijen, Com&Sens en SPIE. Com&Sens van hun kant installeerde 184 Fiber Bragg Grating (FBG) optische vezelsensoren op de brug om spannings- en temperatuurgegevens van het materiaal zelf vast te leggen. SPIE zorgde daarentegen voor een weerstation en een monitoringsysteem met betrekking tot de mechanische delen van de beweegbare brug. Beide systemen zijn voorzien van een router en data wordt automatisch verzonden en verzameld op het volgende online dashboard: <https://www.biobasedbrug-ritsumasyl.nl/>. Op de beweegbare en vaste delen van de brug zijn glasvezelsensoren geïnstalleerd. De sensoren zijn geplaatst tijdens de fabricage en installatie van de brug. De criteria voor de selectie van de locatie van de sensoren zijn:
 - het vastleggen van kritische effecten zoals vermoeidheid,
 - het vastleggen van het optreden van maximale spanning tijdens de levensduur en
 - het afleiden van de vervormde vorm door schatting van de kromming van de brug. De glasvezels zijn verlijmd op de Fiber-Reinforced Polymer (FRP) laminaten. Dit houdt in dat de spanningswaarden die worden geregistreerd van de optische vezelsensoren de spanning weerspiegelen

die het biobased FRP-laminaat daadwerkelijk ervaart. Tijdens het experimentele werk werden de maximaal toelaatbare spanningen voor de laminaten vastgesteld. Deze worden vergeleken met de waarden die de FBG-sensoren teruggeven, wat de mogelijkheid biedt om 'live' een eenheidscontrole te hebben voor de sterkte van de laminaten. Daarnaast is FBG glasvezel aan zowel de boven- als onderzijde van de dwarsdoorsnede, langs het brugdek gepositioneerd. Dit maakt het mogelijk om de kromming langs de brug te berekenen en dus, na twee keer integreren, de 'live' doorbuiging van de brug. Een visuele indicatie van de

Naast het verkrijgen van een verhoogd inzicht in de levensduur van de brug en het vergroten van kennis op het gebied van biobased GVK, voorziet het monitoringsysteem in de behoefte van assetmanagement.

Schematische weergave van het monitoringsysteem *Structural Engineering International 2020 Technisch Rapport 5* de koppeling met asset management, zijn er twee punten die aandacht vereisen voor onderhoud van de beweegbare brug in Ritsumasyl:

- De eerste is de mogelijke noodzaak voor een permanente opvijzeling van het gehele dek bij de rotatie-as 2 als gevolg van een te grote kruipvervorming. Dit is nodig omdat bij een te grote doorbuiging de brug niet uit de steunen van de opleggingen kan loskomen en vervolgens niet kan draaien/openen. Dit aspect wordt aangepakt vanuit het bestaande monitoringssysteem via de berekening van de 'live' doorbuiging, gebruikmakend van de FBG-sensoren die zich langs de brug bevinden.
- Het tweede aandachtspunt betreft het minimaliseren van vermoeiingsschade tijdens openingscycli, die afhankelijk is van het tijdsverschil tussen de opheffingsmechanismen op as 1 en as 3, de temperatuur en kruip, zoals eerder besproken. Dit aspect wordt ook gecontroleerd door de spanningsintervallen van de



4 Brug na realisatie



5 Asnamen van beweegbare brug

vermoeingscycli te identificeren die worden aangegeven door de sensoren die zich dicht bij de boutverbindingen bevinden.

CONCLUSIES

Dit innovatieve brugontwerp toont de toepassingsmogelijkheid van biocomposieten in civiele constructies. Op basis van de materiaalinhoud ligt het percentage biocomposiet van de brug in Ritsumasyl boven de 80%. Dit vormt een mijlpaal in de industrie voor een alternatief materiaal om bij te dragen aan klimaatveranderingsdoelstellingen. Het uiteindelijke doel is om een brug te bouwen van natuurlijke vezels en een 100% biobased hars. Er is veel ruimte voor de ontwikkeling van harsen, hoewel op dit moment de vraag naar dergelijke circulaire oplossingen laag is en daarmee de kosten relatief hoog blijven. Momenteel zijn er verschillende biobased epoxy- en onverzadigde polyesterharsen beschikbaar met een totaal bio-gehalte tussen de 20 en 40%. Dit percentage moet omhoog en de markt moet bereid zijn een hogere prijs te betalen voor meer natuurlijke harsen om hun ontwikkeling te blijven stimuleren. Om ervoor te zorgen dat in deze ontwikkeling grote stappen kunnen en worden gezet, is alle opgedane kennis via de website <https://www.drive.frl/> openbaar gemaakt.

De komende maanden en jaren worden de gegevens van de sensoren gemonitord en geanalyseerd en de bevindingen zullen via de website of via andere kanalen worden gecommuniceerd.

Bruggen zoals deze, met of zonder natuurlijke materialen, kunnen alleen veilig worden ontworpen door gebruik te maken van solide richtlijnen en normen. In Nederland wordt CUR967 gebruikt en ondertussen werkt Europa aan een geheel nieuwe norm: CEN TC250 WG4.

Op het moment van schrijven van dit artikel werkt het projectteam aan een addendum bij CUR96, specifiek voor biobased composieten.

DANKBETUIGINGEN

Dit project was alleen mogelijk met een integraal team waar de partners elkaar volledig vertrouwden en ondersteunden. Het projectteam heet 'DRIVE' met daarin de volgende partners: Provincie Fryslân, Witteveen+Bos, Anteagroup, Strukton Civiel, Green Pac, Sweco, Spie en Delft Infra Composites. Met grote dank aan alle betrokken partners waardoor dit project kon slagen.

OPENBAARMAKINGSVERKLARING

De auteurs hebben geen potentieel belangenconflict gemeld.



REFERENTIES

- [1] Bio-based composite movable bridge, Claassen W, 19th IABSE Congress Stockholm, 21–23 September 2016.
- [2] REPORT 2016036-180413-1410, Bio-based bridge Ritsumasyl Material Properties based on testing, August 1, 2019.
- [3] REPORT 2016036-180125-1431, Bio-based bridge Ritsumasyl, Structural Design, July 12, 2019.
- [4] Halpin JC, Kardos JL. The Halpin Tsai equations: a review. *Polym. Eng. Sci.* May 1976; 16(5).
- [5] Assarar M, Scida D, El Mahi A, Poilâne C, Ayad R. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: flax–fibres and glass–fibres. *Mater. Des.* 2011; 32(2): 788–795.
- [6] Célino A, Fréour S, Jacquemin F, Casari P. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review. *Front. Chem.* 2014; 1(January): 1–12.
- [7] CROW-CUR Recommendations 96:2019 Fibre-reinforced plastics in structural and civil engineering support structures.
- [8] NEN-EN 1990+A1+A1/C2, Eurocode: Basis of structural design.
- [9] NEN-EN 1991-2+C1 Eurocode 1: Actions on structures – Part 2, Traffic loads on bridges.
- [10] NEN-EN 1991-1-7+C1+A1, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–7: General actions – Accidental actions.
- [11] JRC 53442 Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations EUR 23984; 2009.