

Opleveringsproeven

TETRA project C-Bridge

Deze whitepaper werd opgesteld in het kader van het TETRA project C-Bridge en geeft een overzicht van enkele tijdens de loopduur van het project uitgevoerde opleveringsproeven. Hierbij gaat het voornamelijk om trillingsproeven op tien composietbruggen in Vlaanderen uitgevoerd door UGent, trillingsproeven op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge uitgevoerd door KULeuven, belastingsproeven met een dienstvoertuig op de stroomafwaartse Canadabrug en de brug in Tremelo door MOW en een halflastbelastingsproef en kwartlastkruipproef op de stroomopwaartse Canadabrug uitgevoerd door WTCB.

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.

- Laminatentheorie – Laminaattheorie
- Bruikbaarheidsgrenstoestand – Gebruiksgrenstoestand
- Poisson coëfficiënt – Poisson-factor

INHOUDSOPGAVE

Lijst met figuren.....	3
Lijst met tabellen.....	3
1 Inleiding.....	5
2 Trillingsproeven tien composietbruggen in Vlaanderen (UGent).....	6
2.1 Bestudeerde GVVK voetgangersbruggen in Vlaanderen.....	7
2.2 Modale testen en parameteridentificatie van GVVK voetgangersbruggen.....	8
2.3 Comfortanalyse van GVVK voetgangersbruggen.....	10
3 Trillingsproeven Canadabrudden (KULeuven).....	11
3.1 Identificeren van de modale karakteristieken.....	12
3.2 Mens-geïnduceerde trillingen.....	13
4 Belastingproef Tremelo.....	16
4.1 Belastingprogramma.....	16
4.2 Theoretisch berekende vervorming.....	17
4.3 Opgemeten doorbuiging.....	17
5 Belasting- en kruipproef Canadabrudden.....	18
5.1 Belastingproef westelijke Canadabrug (MOW).....	19
5.2 Belasting- en kruipproef oostelijke Canadabrug (WTCB).....	21
6 Conclusie.....	28

LIJST MET FIGUREN

Figuur 1: Meetrooster en opstellingen van sensoren voor trillingsproeven KULeuven	12
Figuur 2: Foto's van de uitvoering van de drie belastingsfasen voor de belastingsproef op de composietbrug in Tremelo	16
Figuur 3: Meetrooster en positionering van de meetpunten voor de opmeting van de doorbuiging tijdens de belastingsproef op de composietbrug in Tremelo	17
Figuur 4: Grafische weergave van de doorbuiging van de composietbrug in Tremelo voor de drie belastingsfasen en langs meetlijn 1, meetlijn 2 en de centrumlijn.....	18
Figuur 5: Foto van de uitvoering van de belastingsproef met het 5,32 ton dienstvoertuig op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge	19
Figuur 6: Gehanteerde meetrooster en positionering van de verkenmerken tijdens de belastingsproef op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge	19
Figuur 7: Opgemeten doorbuiging tijdens de belastingsproef op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge voor de drie belastingsfasen en meetlijn 1 en meetlijn 2.....	21
Figuur 8: Procedure voor het vullen (boven) en leegmaken (onder) van de watervaten op het brugdek	22
Figuur 9: Positionering van de 32 IBC watervaten op en de vijf prisma's langs de rand van het brugdek op de stroomopwaartse Candabrug te Brugge	22
Figuur 10: Absolute temperatuur- (boven) en rekverloop (onder) opgemeten door BOFDA in functie van de tijd over de duur van de halflastproef in het midden van de overspanning van de stroomopwaartse Canadabrug aan de Maria van Bourgondiëlaan	23
Figuur 11: Doorbuigingsverloop met semi-continu totaalstation en punctuele topografische opmetingen in functie van de tijd over de duur van de halflastproef in het midden van de overspanning van de stroomopwaartse Canadabrug aan de Maria van Bourgondiëlaan	23
Figuur 12: Doorbuiging en rekken tijdens de belasting en ontlasting tijdens de halflastproef	25
Figuur 13: Theoretisch berekend temperatuurseffect op de stroomopwaartse Canadabrug te Brugge bij een temperatuursverschil van 40°C tussen de boven- en onderflens	26
Figuur 14: Kwartlastkruipproef op stroomopwaartse Canadabrug te Brugge.....	26
Figuur 15: Temperatuur- en rekverloop in functie van de tijd over de duur van de kwartlastproef....	27
Figuur 16: Rekverloop in de draagrichting van de brug t.o.v. de referentiemeting	28

LIJST MET TABELLEN

Tabel 1: Bestudeerde GVVK bruggen	8
Tabel 2: Eerste eigenfrequentie en dempingsverhouding voor de eerste drie trillingsmodi voor de vier individuele opstellingen en voor alle opstellingen.....	13
Tabel 3: Maximale en kwadratengemiddelde (RMS) versnellingen in de longitudinale, laterale en verticale richting voor de verschillende belastingsgevallen en -typen (wandelen, joggen en springen)	14
Tabel 4: Theoretisch berekende en opgemeten doorbuiging van de composietbrug in Tremelo.....	17

Tabel 5: Theoretisch berekende (SCIA Engineer) en opgemeten doorbuiging tijdens de belastingsproef op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge 20

1 INLEIDING

Wat de eisen bij oplevering betreft is het belangrijk om informatie binnen de Vlaamse context op te doen. Vanuit structureel oogpunt is het belangrijk te noteren dat parameters zoals sterkte, stijfheid, trillingsdemping enz. niet zo eenvoudig uit klassieke materiaaltesten zoals een drukproef op een betonkubus of een trekproef op wapeningsstaal te halen zijn. De basisgegevens van sterkte en stijfheid van hars en vezel zijn bekend maar het oneindige aantal combinaties van die twee materialen in massaverhouding en vezelrichtingen laat alleen een voorspelling toe van de eigenschappen van het uiteindelijke composiet. Het is in deze sector niet gebruikelijk om testen te eisen op dat composietmateriaal, dat enkel in exact dezelfde samenstelling beschikbaar is in de brug zelf. Stijfheid en trillingsgedrag worden typisch gemeten op de volledige constructie, “as built” of voorafgaand aan de plaatsing. Bij verschillende in Nederland gebouwde bruggen is dat in extenso uitgevoerd. In Vlaanderen is dit bij geen enkele brug al toegepast. Er kan enkel worden voortgegaan op resultaten uit Nederland die slechts in beperkte mate toegankelijk zijn. Voor het trillingsgedrag is er zelfs op wetenschappelijk niveau nog geen consensus omtrent de dempingswaarden voor composieten. Het is ook niet noodzakelijk zo dat de Nederlandse situaties onmiddellijk overdraagbaar zijn naar de Vlaamse realiteit. De eisen uit standaardbestek 260 of andere eisen die in Vlaanderen worden gesteld zijn niet noodzakelijk dezelfde als deze die in Nederland door de gemeenten of door Rijkswaterstaat worden gesteld. Het is dan ook belangrijk om inzichten te krijgen in het stijfheidsgedrag, het trillingsgedrag, enz. binnen de Vlaamse context.

Dit houdt dus een verschuiving in op het vlak van kwaliteits- en opleveringscontroles, van materiaalniveau naar structuurniveau. Om de doelgroep hier eigen mee te maken, en om dit ook uitvoerig te kunnen documenteren, worden in dit werkpakket een aantal in situ proeven voorzien op de aangeleverde cases. Deze proeven worden in overleg tussen UGent – WTCB en de aanleverende partijen (overheid) uitgewerkt. Het gaat dan om ten minste een belastingsproef met opmeting van doorbuiging en spanningen en een trillingsproef. Afhankelijk van de mogelijkheden zal er uitgebreid worden met vervormingsmetingen of andere metingen, die gebruikt zouden kunnen worden voor een monitoring op langere termijn (hiervoor worden twee cases uitgekozen). Ook de algemene staat, verkleuring, lokale defecten, afwatering, ruwheid, ... kunnen als langetermijnparameters worden opgevolgd. Op basis van de resultaten kunnen de eisen bij oplevering nauwkeuriger worden gedefinieerd. De monitoringsdata zal ook helpen om voor bouwheren en aannemers te illustreren dat het vooropgestelde gedrag van de composietbruggen effectief wordt gerealiseerd.

2 TRILLINGSPROEVEN TIEN COMPOSITETBRUGGEN IN VLAANDEREN (UGENT)

Mens-geïnduceerde trillingen op voetgangersbruggen werden de afgelopen jaren steeds belangrijker in het ontwerp, aangezien de gemeenschap vraagt naar esthetisch aangemere en slankere bruggen. Bovendien leidden nieuwe materialen, ontwerpmethoden, bouwtechnieken en de betrokkenheid van architecten tot langere en slankere bruggen. Hierdoor worden voetgangersbruggen steeds gevoeliger voor mens-geïnduceerde trillingen, waardoor voetgangers ongemak ondervinden en het nut van de constructie in gevaar komt, ook al is de brug structureel in orde en veilig om over te steken. Hierbij kan gedacht worden aan de Millennium voetgangersbrug in Londen, die door onverwachte mens-geïnduceerde trillingen twee dagen na de opening op 10 juni 2000 weer gesloten diende te worden voor het aanbrengen van gestemde massadempers om de horizontale en verticale bewegingen van de brug onder controle te houden. Ontwerpcodes pakken dit dynamische probleem aan door het opleggen van limieten voor de eerste eigenfrequentie en simplistische voorwaarden om het comfort van de voetgangersbrug aangenaam te houden.

Door de succesvolle toepassing van vezelversterkte kunststoffen (VVK) composietvormen en constructies in de luchtvaart, offshore, zee- en windturbinesector, worden deze materialen steeds vaker aangewend voor dragende civieltechnische constructies. In brugconstructies spelen vooral de goede mechanische eigenschappen zoals de hoge sterkte en stijfheid-gewichtsverhouding in vergelijking met traditionele bouwmaterialen (gewapend beton, staal en hout) een belangrijke rol voor de selectie van dit materiaal. Daarnaast zijn de lage onderhoudskosten, de snelheid van constructie en het installatiegemak belangrijke punten voor de toepassing van deze materialen in korte en middellange voetgangersbruggen en bruggen met weinig tot middelzwaar wegverkeer. Voor slanke, lichtgewicht bruggen zoals bruggen van glasvezelversterkte kunststoffen (GVVK) kan de dynamische problematiek aanzienlijk worden en is een verfijnde analyse vereist om aan te tonen dat het gewenste comfortniveau bereikt kan worden.

Voor GVVK bruggen zijn, vanwege het lage eigengewicht in vergelijking met beton en de beperkte stijfheid in vergelijking met staal, de verticale doorbuigingen en de mens-geïnduceerde verticale trillingen de typische ontwerpcriteria in plaats van de uiterste sterkte van het materiaal (zie C-Bridge whitepaper 'Ontwerpmethodes en softwarematige analysetechnieken'). Het is daarom belangrijk om de trillingsrespons van deze GVVK voetgangersbruggen nauwkeurig te beoordelen. Bovendien zal, vanwege het lage gewicht van de GVVK bruggen, de niet-structurele massa van voetgangers op het brugdek een belangrijke rol spelen in het algemene trillingsgedrag van de voetgangersbrug. De interactie tussen mens en structuur is een bekend fenomeen waarbij de dynamica van de twee subsystemen op elkaar inwerken en elkaar gaan beïnvloeden. Door deze interactie kunnen bepaalde dynamische eigenschappen, zoals de eerste eigenfrequentie en de structurele dempingsverhouding van de constructie, aanzienlijk worden gewijzigd. De huidige ontwerprichtlijnen houden echter geen rekening met deze interactie tussen mens en structuur, waardoor de werkelijke dynamische eigenschappen van de constructie in het ontwerp zullen onder- of overschat worden.

Het trillingsgedrag van voetgangersbruggen onder een voetgangersstroom is een belangrijke gebruiksgrenstoestandscontrole. Een onnauwkeurige inschatting van de trillingsrespons in het brugontwerp kan leiden tot overmatige trillingen tijdens het gebruik van de brug. Aan de andere kant zullen zeer conservatieve inschattingsmodellen voor de trillingsrespons leiden tot overdimensionering en bijgevolg een hoger gewicht, emissie-impact en productiekosten. Er zijn echter slechts enkele internationale onderzoeken uitgevoerd om het trillingsgedrag van GVVK constructies nauwkeurig weer te geven. Om deze redenen werden in het kader van dit TETRA onderzoeksproject C-Bridge en op vraag van verschillende leden van de gebruikersgroep meerdere trillingsproeven op tien GVVK voetgangers- en fietsersbruggen in Vlaanderen uitgevoerd om een eerste inschatting te krijgen van de eerste

eigenfrequentie, de structurele dempingsverhouding en het bijbehorende comfort van deze bruggen. De bijdrage van dit onderzoek bestaat voornamelijk uit:

- Op een eenvoudige, goedkope en betrouwbare manier nauwkeurige trillingsgegevens te verzamelen met behulp van de versnellingsmeters van smartphones aan de hand van een vrij verkrijgbare applicatie;
- Het definiëren van eenvoudige testmethoden om de trillingseigenschappen, zoals de eerste eigenfrequentie en de structurele dempingsverhouding, van de bruggen te bepalen;
- Een eerste inschatting van de minimum, maximum en gemiddelde waarde van de eerste eigenfrequentie en structurele dempingsverhouding van de geteste GVVK bruggen;
- Beoordeling van de normen en richtlijnen in het kader van de comforteisen en de daaraan gekoppelde grens voor de eigenfrequentie waarboven geen resonantie van de brug te verwachten is onder een bepaalde voetgangersstroom;
- Een vergelijking tussen een analytisch rekenmodel op basis van één van de geteste bruggen en de momenteel beschikbare richtlijnen, en de werkelijk gemeten trillingseigenschappen.

In sectie 0 worden de geometrische eigenschappen van de bestudeerde GVVK voetgangers- en fietsersbruggen in Vlaanderen gegeven. Sectie 2.2 beschrijft eerst de meetmethode via de VibSensor smartphone-applicatie, gevolgd door een beschrijving van de hiel- en excitatietests en de resultaten gerelateerd aan de eerste eigenfrequentie in buiging en de structurele dempingsverhouding van de brug. De comfortanalyse van vijf GVVK voetgangersbruggen voor twee belastingssituaties (wandelen en joggen) en verschillende voetgangersdichtheden zoals beschreven in het JRC-document '*Ontwerp van lichtgewicht voetgangersbruggen voor door mensen veroorzaakte trillingen*' wordt besproken in sectie 2.3.

Het onderzoek en de resultaten werden tevens gepubliceerd in het internationaal gerenommeerde journal 'Composite Structures' met de titel '*Measured dynamic properties of web-core sandwich panel FRP composite footbridges and their relation to pedestrian comfort analysis*'. De paper kan via de volgende link teruggevonden worden.



[Measured dynamic properties of web-core sandwich panel FRP composite footbridges and their relation to pedestrian comfort analysis](#)

[Jordi Uyttersprot & Wouter De Corte](#)

[Composite structures \(2020\) 113236](#)

2.1 Bestudeerde GVVK voetgangersbruggen in Vlaanderen

Tabel 1 geeft een overzicht van de bestudeerde GVVK voetgangers- en fietsersbruggen in Vlaanderen die opgenomen werden in het onderzoek. Hierin worden tevens de opgemeten geometrische eigenschappen van de composietbruggen opgegeven.

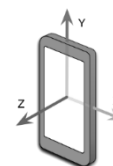
Tabel 1: Bestudeerde GVKK bruggen

Nr.	Locatie	Afk.	Nuttige breedte, B_{nut} [m]	Lengte(n), L [m]	Oppervlakte, A [m ²]
1	Brugge	BRG1	4,0	18,0 - 8,0 - 14,9	163,60
2	Brugge	BRG2	4,0	17,6 - 8,0 - 15,9	167,60
3	Maldegem	MAL	2,4	8,6	20,52
4	Gent	GHE	2,5	17,5	43,75
5	Puurs	PUU	4,2	16,6	69,72
6	Mortsel	MOR	4,3	29,2	114,38
7	Deurne	DEU	2,8	10,0 - 10,0	56,00
8	Lille	LIL	2,5	20,3	50,75
9	Tremelo	TRE	3,0	10,3	30,90
10	Galmaarden	GAL	2,0	14,0	28,00

2.2 Modale testen en parameteridentificatie van GVKK voetgangersbruggen

2.2.1 VibSensor-gebaseerde smartphone versnellingsdataverzameling

De VibSensor-applicatie wordt gebruikt voor het opmeten van de trillingen en versnellingen op de GVKK voetgangersbruggen. VibSensor is een applicatie voor Android en IOS apparaten uitgebracht door Now Instruments. Het maakt de gebruiker mogelijk om op een eenvoudige manier acceleratiegegevens te verzamelen, te analyseren en te exporteren vanop de vertrouwde omgeving van de eigen smartphone. Bovendien maakt deze applicatie het mogelijk om gegevens te verzamelen met een groot aantal 'sensoren' tegen slechts een fractie van de kostprijs die normaal gesproken gepaard gaat met het meten van versnellingen van civieltechnische constructies. De versnellingsmeter in de smartphone meet de versnelling langs drie hoofdassen van het toestel, gelabeld zoals weergegeven in nevenstaande figuur. Tijdens de tests wordt de smartphone met de x-as in de lengterichting van de brug geplaatst.



De opgemeten versnellingsdata bevat de effecten van de zwaartekracht plus eventuele andere versnellingen die het apparaat mogelijks ervaart. Bij het verzamelen en analyseren van de data wordt de data opgesplitst in het langzaam variërende kantelen (tilt) en de snel variërende trillingen.

De trillingsdata wordt verzameld over een tijdsinterval van 60 seconden met een hoogfrequent acquisitiebereik. Het acquisitiebereik is afhankelijk van de maximale opmeetfrequentie die door het toestel wordt ondersteund, en maakt analyse van trillingsfrequenties tussen 0,03 en 50 Hz mogelijk. Het rapport na het beëindigen van de metingen in VibSensor bevat een samenvatting van de gegevensverzameling, inclusief vier interactieve grafieken, namelijk het vermogenspectrum (Power Spectrum), de trillingen, de kanteling en de onbewerkte opgemeten versnellingsmetergegevens van het apparaat. Het vermogenspectrum wordt berekend van 0 Hz tot de Nyquist-frequentie. De trillingsdata bevat de hoogfrequente versnellingsgegevens, terwijl de kantelingsdata de laag frequente versnellingsdata weergeeft.

2.2.2 Hiel- en excitatietesten

De hieltest (HT) is een zeer eenvoudige en gemakkelijk uit te voeren test waarbij één persoon, ook wel de operator genoemd, een trilling veroorzaakt op een vooraf gedefinieerde locatie op de brug. De operator gaat hierbij eerst op de tippen van de tenen staan, waarna deze zich op de hielen laat vallen om een impact op de het brugdek te veroorzaken. Aangezien het gewicht van de persoon en de impacthoogte constant blijven tijdens de verschillende testen, zal ook de impactenergie ongeveer constant blijven, waardoor een goede vergelijking tussen de verschillende metingen op eenzelfde brug mogelijk is. Tijdens een meting worden meerdere impacts uitgevoerd met een interval van 10

seconden, resulterend in zes quasi-constante trillingen die kunnen worden geanalyseerd. De test is daardoor zeer gemakkelijk reproduceerbaar en kan met een minimum aan middelen worden uitgevoerd.

Bij de excitatietest (ET) wordt gepoogd om de brug te exciteren volgens de eerste eigenfrequentie. Op basis van de resultaten van verschillende hielproeven op de brug kan een inschatting worden gemaakt van de eerste eigenfrequentie van de brug die met één persoon wordt belast. Deze eerste eigenfrequentie in Hertz wordt omgezet in een aantal beats per minuut (BPM) die in een metronoom worden ingevoerd. Naderhand zal één persoon een trilling veroorzaken in het midden van de brug door het repetitief buigen van de knieën volgens het berekende aantal BPM. Het is erg belangrijk dat de voeten/hielen tijdens het uitvoeren van deze test niet loskomen van het oppervlak van de brug, aangezien anders een impact op de brug wordt geïnduceerd, waardoor het signaal van de trilling wordt verstoord.

Het nadeel van deze methode is dat deze niet toepasbaar is bij relatief stijve bruggen, aangezien deze een hoge eerste eigenfrequentie zullen hebben, waardoor het voor een mens niet meer mogelijk is om het benodigde aantal BPM te produceren. In dit geval is het nog steeds mogelijk om een excitatie te veroorzaken met de helft van de eerste eigenfrequentie/BPM, d.w.z. de tweede harmonische. Als de bestudeerde brug echter een hoge structurele dempingsverhouding heeft, zal de trilling zeer snel afnemen en kan één persoon niet voldoende energie aan de brug toevoegen om deze in excitatie te brengen. Dit was onder meer het geval voor de Canadabridgen te Brugge. Energie wordt door de operator aan de brug toegevoegd totdat een maximale verticale versnelling van de brug is bereikt, waarna de brug vrij trilt met één persoon.

Verder moet worden opgemerkt dat testresultaten van de HT en ET naast aan de structuur ook gerelateerd zijn aan het operator-structuursysteem. De aanwezigheid van de operator voor het aanbrengen van de trilling heeft een duidelijke invloed op de dynamische eigenschappen van de GVVK voetgangersbrug, aangezien de eerste eigenfrequentie van dit systeem dicht bij de frequentie van het menselijk lichaam ligt. Dit mechanisme kan leiden tot verschillende wijzigingen van de dynamische eigenschappen van het operator-structuursysteem, inclusief de toename of afname van natuurlijke frequenties, toename of afname van dempingsverhoudingen en zelfs het verschijnen van nieuwe trillingsmodi.

Om een nauwkeurig beeld te krijgen van de trilling van de gehele brug, wordt een meetrooster opgesteld. Het meetrooster bestaat uit vijf meetpunten langs de hartlijn in de draagrichting van de brug (op 0,5 m van beide uiteinden en op 25%, 50% en 75% van de lengte van de brug). Hetzelfde raster wordt gebruikt voor de positionering van de operator bij de hieltest. In beide tests worden twee meetinstrumenten gebruikt om de trillingen van de GVVK voetgangersbruggen te registreren. Hierbij bevindt het primaire meetinstrument zich altijd in het midden van de brug en wordt het secundaire meetinstrument afwisselend op een ander meetpunt geplaatst.

2.2.3 Resultaten eerste eigenfrequentie

Voor het bepalen van de eerste eigenfrequentie van de GVVK voetgangersbruggen wordt de maximale waarde van het vermogenspectrum (PSD) gebruikt die rechtstreeks uit de VibSensor applicatie afgeleid kan worden voor de HT en ET. Aangezien een maximale joggingfrequentie van 3,5 Hz is vastgesteld in het JRC-document, wordt een interval van 0 Hz tot tweemaal de joggingfrequentie (7 Hz) worden vastgelegd voor het bepalen van eerste eigenfrequentie. Dit interval houdt rekening met de mogelijkheid dat de tweede harmonische van de joggingbelasting de buigmodi van de brug kan opwekken.

De resultaten geven aan dat noch de testmethode (d.w.z. HT of ET), noch de locatie van de geïnduceerde trilling invloed hebben op de waarde van de eerste eigenfrequentie van de brug. De

eerste eigenfrequentie van de verschillende GVVK voetgangersbruggen is sterk afhankelijk van veel factoren, zoals de overspanning, de breedte en de constructiehoogte van de brug, evenals de randvoorwaarden en de mate van hyperstaticiteit. Er kan echter worden geconcludeerd dat de eerste eigenfrequenties van de bestudeerde GVVK voetgangersbruggen in een bereik van 3,8 tot 6,5 Hz liggen. Uit resultaten van metingen over de volledige lengte van de brug blijkt dat de eerste natuurlijke eigenfrequentie over de lengte van de brug ongeveer gelijk blijft, met een variatie van de maximale tot de minimale waarde tussen 3,3% en 7,6%.

2.2.4 Resultaten structurele dempingsverhouding

2.2.4.1 Hieltest

Enkel de trillingen in de verticale z-richting worden in rekening gebracht voor het bepalen van de dempingsverhouding. De verticale trillingen worden eerst onderworpen aan een bandstop Butterworth filter van de tweede orde met een lagere en hogere afsnijfrequentie van respectievelijk 0,5 Hz onder en 0,5 Hz boven de eerste eigenfrequentie van de respectievelijke meting op de brug. De samplefrequentie in deze filter is gelijk aan de samplefrequentie van de VibSensor-applicatie voor de betreffende meting. Bovendien wordt er ook een Gauss-gewogen voortschrijdend gemiddelde afvlakking toegepast op de resulterende data met een intervallengte van 10 (vijf elementen achteruit en vijf elementen vooruit). Beide bewerkingen verwijderen tweede-orde-effecten en extreme waarden uit de trillingsdata en leiden tot meer waarheidsgetrouwe dempingsverhoudingen in de berekening.

De logaritmische afname in de tijd van de versnellingsamplitude en de bijbehorende dempingsverhouding wordt vervolgens voor de positieve en negatieve overshoots bepaald voor de verschillende individuele trillingen van de HT. Hieruit kan voor elke meting een gemiddelde en standaarddeviatie berekend worden voor de dempingsverhouding van de betreffende trilling. Deze procedure wordt herhaald voor alle metingen op de verschillende meetpunten en maakt het mogelijk om de dempingsverhouding voor verschillende belastingssituaties en meetlocaties te analyseren.

De minimale, maximale en gemiddelde waarden van de dempingsverhouding tijdens de HT met één persoon op de centrumlijn (0,5L) van de betreffende bruggen zijn respectievelijk 1,28%, 3,66% en 1,87%, terwijl deze waarden voor de test met twee personen gelijk zijn aan 1,35 %, 4,66% en 2,36% respectievelijk. Uit de gemiddelde waarden blijkt dat er een zekere mens-structuurinteractie aanwezig is voor de dempingsverhouding van de GVVK voetgangersbruggen.

2.2.4.2 Excitatie-test

De verticale z-trillingen van de excitatie-test worden tevens onderworpen aan de in de vorige paragraaf beschreven bandstop Butterworth tweede-ordefiltering en Gauss-gewogen voortschrijdend gemiddelde afvlakking. Voor de berekening van de dempingsverhouding wordt alleen rekening gehouden met de vrije trilling aan het einde van de test, zonder interactie van de operator. Hieruit worden vervolgens tevens de positieve en negatieve overshoots bepaald voor de berekening van het logaritmisch decrement en de structurele dempingsverhouding van de GVVK voetgangersbrug.

De gemiddelde waarden van de dempingsverhouding voor één en twee personen voor de verschillende bruggen zijn respectievelijk 1,87% en 2,25%.

2.3 Comfortanalyse van GVVK voetgangersbruggen

Van de tien bestudeerde bruggen worden vijf bruggen (namelijk Gent, Puurs, Mortsel, Deurne en Tremelo) belast met verschillende voetgangersstromen en belastingssituaties. In totaal worden twee verschillende mens-geïnduceerde belastingssituaties bestudeerd voor verschillende voetgangersdichtheden, namelijk vrij wandelen en joggen. Hierbij wandelen of joggen de voetgangers gedurende

60 seconden met de klok mee op de brug in een zelfgekozen vrij tempo. Per brug worden in totaal zes metingen verricht.

De gemeten versnellingsdata van de VibSensor applicatie in de z-richting kan direct worden vergeleken met de eisen voor de comfortklassen uit het JRC-document. Voor de verschillende bestudeerde bruggen en voetgangersdichtheden werden de maximale en kwadratengemiddelde (RMS) waarden van de verticale z-versnelling bepaald.

Uit de metingen kan worden geconcludeerd dat de voetgangersdichtheid geen lineair verband vertoont met de grootte van de verticale trillingen. Zo leidt een voetgangersdichtheid van $0,5 \text{ P/m}^2$ in de bovenstaande tabellen niet noodzakelijk tot de grootste verticale versnellingen. Hieruit blijkt dat het menselijk lichaam een zekere demping toevoegt aan de lichtgewicht GVVK voetgangersbruggen, aangezien de verhouding van de toegevoegde massa van de voetgangersstroom tot het eigengewicht van de brug vrij groot is in vergelijking met bruggen uit traditionele bouwmaterialen.

Uit de maximum- en RMS-waarden van de verticale versnelling voor de verschillende GVVK voetgangersbruggen kan besloten worden dat in het geval van wandelen alle bruggen in het merendeel van de tijd (RMS-waarde) in comfortklasse 1 (CC1, lager dan $0,5 \text{ m/s}^2$) kunnen geklasseerd worden, wat de meest gewenste comfortklasse is, en dat de bestudeerde bruggen slechts gedurende een zeer korte periode (MAX-waarde) stijgen naar comfortklasse 2 (CC2, $0,5 \text{ m/s}^2$ tot $1,0 \text{ m/s}^2$). In het geval van joggen bevinden alle bruggen, behalve de Tremelobrug, zich het meeste van de tijd in CC2 terwijl dit voor korte perioden toeneemt tot CC3 ($1,0 \text{ m/s}^2$ tot $2,5 \text{ m/s}^2$) of zelfs CC4 (hoger dan $2,5 \text{ m/s}^2$).

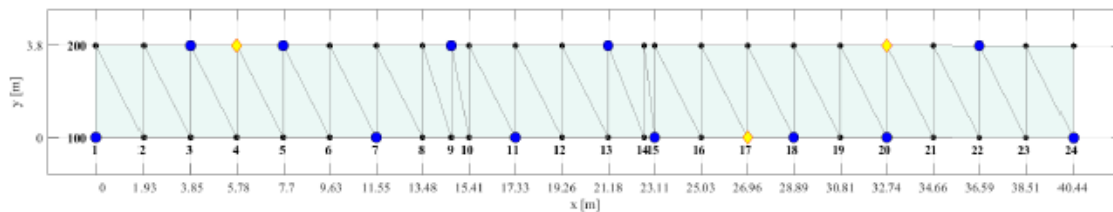
De resultaten wijzen op het huidige onvermogen om het voetgangerscomfort van GVVK voetgangersbruggen nauwkeurig te voorspellen, aangezien door de mens veroorzaakte demping niet is opgenomen in de huidige ontwerprichtlijnen en normatieve documenten. Een op comfort gebaseerd ontwerp voor voetgangers onderschat waarschijnlijk de werkelijke demping en leidt tot een overconservatieve dimensionering. Daarnaast zijn op basis van de gemeten eigenfrequenties geen onaanvaardbare trillingen te verwachten onder de toegepaste voetgangersstromen volgens de huidige normen en richtlijnen. Deze verwachting kan echter niet worden ondersteund door de bekomen resultaten van de uitgevoerde comfortanalysetests.

3 TRILLINGSPROEVEN CANADABRUGGEN (KULEUVEN)

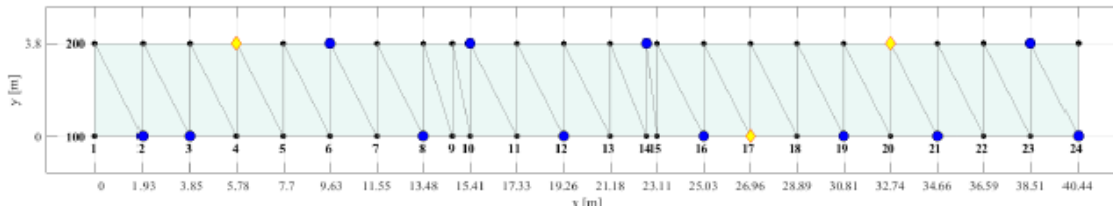
Het meetrooster met de knooppuntnummers van 48 meetpunten op de Canadabridgen en de bijhorende coördinaten wordt gevisualiseerd in Figuur 1. Elk meetpunt wordt geïdentificeerd door een uniek nummer dat bepaald wordt door het longitudinale asnummer bij het transversale asnummer op te tellen. Zo is punt 112 bijvoorbeeld het punt op de kruising van de longitudinale as 100 en de transversale as 12. De tri-axiale versnellingssensoren (GeoSIG GMS-18-63) worden volgens de vier weergegeven opstellingen geïnstalleerd op specifiek geselecteerde meetpunten van het rooster, met drie referentiesensoren die bij alle opstellingen blijven staan (aangeduid in het geel), en twaalf rovingensensoren die voor de verschillende opstellingen verplaatst worden naar andere meetpunten (aangeduid in het blauw).



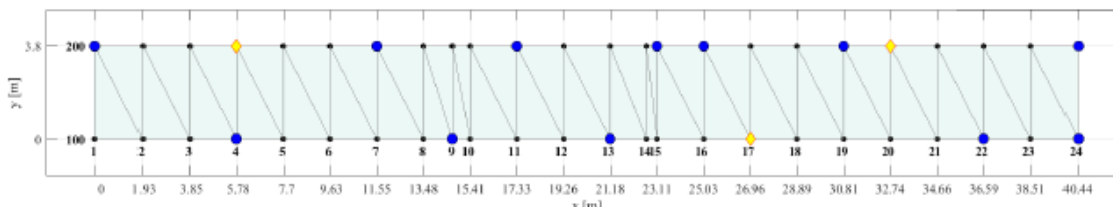
Tijdens de metingen worden twee soorten excitaties bestudeerd, namelijk in de eerste plaats de omgevingstrillingen (versnellingen) opgemeten gedurende 900 seconden en in de tweede plaats hamerinslagen nabij locatie 220 opgemeten over een tijdsperiode van 600 seconden.



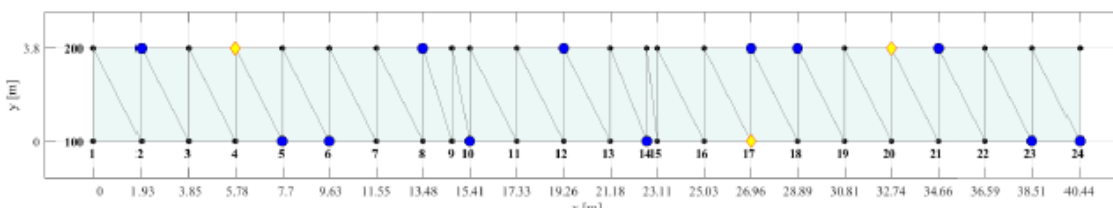
Opstelling 1



Opstelling 2



Opstelling 3



Opstelling 4

Figuur 1: Meetrooster en opstellingen van sensoren voor trillingsproeven KULeuven

Hierna wordt de trillingsdata als volgt verder verwerkt:

1. Verwijderen van de offset;
2. Uitdunnen van de trillingsdata met een factor 4, resulterend in een samplefrequentie van 50 Hz. Aangezien de bruikbaarheid van trillingen van voetgangersbruggen wordt bepaald door (bijna-) resonante excitatie met één van de dominante trillingen van menselijke excitatie (<5 Hz), is het doel om de laagfrequente modi van de constructie te identificeren;
3. Toepassen van een hoogdoorlaatfilter met een frequentie van 0,25 Hz;
4. De relevante tijdsspannes voor de verschillende metingen worden geselecteerd;

3.1 Identificeren van de modale karakteristieken

In totaal worden drie modi geïdentificeerd met een eigenfrequentie lager dan 7 Hz. Tabel 2 geeft een overzicht van de eigenfrequenties en modale dempingsverhoudingen van de drie modi gebaseerd op de trillingsdata van het brugdek, waarbij zowel één individuele opstelling als alle opstellingen tegelijkertijd worden beschouwd. Er kan worden opgemerkt dat er een kleine verschuiving is in eigenfrequenties (en modale dempingsverhoudingen) over de verschillende setups voor alle drie de modi. Dit kan worden toegeschreven aan (kleine) schommelingen in de omgevingstemperatuur tijdens de meetcampagne.

Bovendien is de Modal Phase Collinearity (MPC) toegevoegd in de tabel voor het resultaat rekening houdend met alle opstellingen. De MPC is een indicator die de mate van complexiteit van een modus controleert. Voor reële modi, d.w.z. zoals die worden verwacht voor proportioneel of licht gedempte constructies, benadert deze index één. De MPC-waarde kan bijgevolg gebruikt worden als indicator voor de kwaliteit van de geïdentificeerde modusvormen.

Tabel 2: Eerste eigenfrequentie en dempingsverhouding voor de eerste drie trillingsmodi voor de vier individuele opstellingen en voor alle opstellingen

j	Opst. 1		Opst. 2		Opst. 3		Opst. 4		Alle opst.			Dominante buigmode
	f _j [Hz]	ξ _j [%]	f _j [Hz]	ξ _j [%]	f _j [Hz]	ξ _j [%]	f _j [Hz]	ξ _j [%]	f _j [Hz]	ξ _j [%]	MPC [-]	
1	5,17	0,49	5,11	0,85	5,16	0,77	5,14	0,75	5,14	0,72	1,00	Verticale buigmode overspanning 17,76 m
2	6,36	1,71	6,45	2,21	6,36	1,89	6,29	2,15	6,36	1,99	0,98	Laterale buigmode hele brug
3	6,77	1,40	6,85	3,67	6,89	0,78	6,77	0,95	6,82	1,70	0,70	Verticale buigmode overspanning 14,68 m

3.2 Mens-geïnduceerde trillingen

Om de gevoeligheid van de voetgangersbrug voor mens-geïnduceerde trillingen te onderzoeken, is een reeks kritische eigenfrequenties van de constructie geselecteerd. Deze kritische frequenties f_c worden in situ bepaald aan de hand van de structurele respons als gevolg van omgevingsexcitatie. Deze kritische eigenfrequenties komen overeen met één van de geïdentificeerde modi uit de bovenstaande tabel. De volgende types menselijke excitatie worden beschouwd:

- Vrij wandelen/joggen:
De voetgangers zullen de brug oversteken volgens een zelfgekozen wandel- en jogsnelheid.
- Synchronoos wandelen/joggen/springen:
Met behulp van een metronoomsignaal wordt de stapfrequentie (f_s) van de voetgangers aangepast volgens de eerste of tweede harmonische van de kritische eigenfrequenties f_c van de brug. De personen wandelen/joggen twee aan twee in een rij langs de ene helft van het brugdek (links of rechts), en kruisen het hele bouwwerk vier keer. De springtesten worden uitgevoerd op het antiknooppunt van de doelmodus.

Tijdens de testen wordt de structurele respons geregistreerd op de locaties van meetopstelling 4. Om een bruikbare beoordeling van de piekversnellingsniveaus mogelijk te maken, wordt een band-pass filter met afsnijfrequenties van 0,5 Hz en 15 Hz gebruikt om de niet-relevante bijdragen te elimineren.

In Tabel 3 staan de verschillende testen vermeld, evenals de maximale trillingen in de lengterichting, de laterale en de verticale richting die tijdens de testen werden geregistreerd. Uit deze tabel kan worden opgemaakt dat de maximale verticale versnelling tijdens de wandel- en joggingtesten respectievelijk $1,75 \text{ m/s}^2$ en $4,23 \text{ m/s}^2$ bedraagt, gemeten op respectievelijk meetpunten 220 en 204. De maximale longitudinale trillingen die tijdens de wandel- en joggingtesten worden geregistreerd bedragen respectievelijk $0,23 \text{ m/s}^2$ en $0,51 \text{ m/s}^2$ op de meetpunten 124 en 202. Voor de laterale trillingen bedragen de maximale versnellingen $0,29 \text{ m/s}^2$ voor wandelen en $0,48 \text{ m/s}^2$ voor joggen op respectievelijk de meetpunten 218 en 220. Tijdens de springtesten bedraagt de maximale versnelling in de lengterichting, laterale en verticale richting respectievelijk $0,55$, $0,82$ en $5,66 \text{ m/s}^2$ op roosterpunten 202 en 105.

Tabel 3: Maximale en kwadratengemiddelde (RMS) versnellingen in de longitudinale, laterale en verticale richting voor de verschillende belastingsgevallen en -typen (wandelen, joggen en springen)

Belastingsgeval	Type	f_c [Hz]	f_s [Hz]	n_h [-]	n_{pers} [-]	$u_{max,long}$ [m/s ²]	$u_{RMS,long}$ [m/s ²]	MP max long.	$u_{max,lat}$ [m/s ²]	$u_{RMS,lat}$ [m/s ²]	MP max lat.	$u_{max,vert}$ [m/s ²]	$u_{RMS,vert}$ [m/s ²]	MP max vert.
t1	Wandelen	Vrij	Vrij	-	21	0,09	0,05	202	0,08	0,03	218	0,63	0,37	204
t2	Joggen	Vrij	Vrij	-	19	0,23	0,10	123	0,20	0,09	218	1,64	0,93	220
t3	Wandelen	5,14	2,57	2	21	0,18	0,12	202	0,29	0,12	218	1,65	0,75	221
t4	Joggen	5,14	2,57	2	17	0,28	0,12	124	0,26	0,15	218	2,18	1,02	220
t5	Wandelen	5,17	2,59	2	17	0,23	0,08	124	0,28	0,15	218	1,75	0,76	220
t6	Joggen	2,17	2,59	2	15	0,29	0,15	123	0,32	0,17	218	3,17	1,34	220
t7	Joggen	6,82	3,41	1	15	0,51	0,28	2020	0,48	0,25	220	4,23	2,25	204
t8	Joggen	5,14	2,57	2	2	0,14	0,08	202	0,10	0,05	218	1,04	0,48	117
t9	Joggen	5,17	2,59	2	2	0,11	0,06	202	0,11	0,05	117	0,91	0,44	117
t10	Joggen	6,82	3,41	2	2	0,14	0,06	202	0,09	0,05	218	1,10	0,44	204
t11	Springen	5,14	2,57	2	3	0,39	0,23	123	0,29	0,13	117	3,16	1,79	220
t12	Springen	5,17	2,59	2	3	0,37	0,22	123	0,27	0,12	117	2,77	1,36	117
t13	Springen	6,82	3,41	2	3	0,55	0,29	2020	0,82	0,42	105	5,66	2,61	105

De (maximale) versnellingen worden geëvalueerd in verhouding tot de verticale en horizontale comfortlimieten zoals voorgesteld door de ontwerpgids HiVoSS. De comfortlimieten uit HiVoSS zijn identiek aan deze gedefinieerd in het JRC-document, gehanteerd in de trillingsproeven van de UGent. De volgende observaties worden gedaan voor de geregistreerde versnellingen op de brug:

- Wandelen:
 - Belastinggeval [t1]: maximaal comfort wordt bereikt in horizontale richting en middelmatig comfort in verticale richting;
 - Belastinggevallen [t3, t5]: middelmatig comfort wordt bereikt in horizontale richting, minimaal comfort in verticale richting. Met betrekking tot de laterale trillingsniveaus wordt de drempel voor het optreden van lock-in, gelijk aan $0,1 \text{ m/s}^2$, overschreden.
- Joggen:
 - Belastinggeval [t9]: middelmatige comfortniveaus worden in alle richtingen waargenomen;
 - Belastinggevallen [t2, t4, t8, t10]: middelmatig comfort wordt bereikt in horizontale richting terwijl minimaal comfort wordt bereikt in verticale richting;
 - Belastinggevallen [t6, t7]: minimale comfortniveaus worden bereikt in horizontale richting terwijl onaanvaardbare trillingen in verticale richting worden geregistreerd.
- Springen:
 - Belastinggevallen [t11, t12]: minimaal comfort wordt bereikt in horizontale richting terwijl onaanvaardbaar hoge trillingsniveaus in verticale richting worden geregistreerd;
 - Belastinggeval [t13]: er worden onaanvaardbaar hoge trillingsniveaus geregistreerd in zowel horizontale als verticale richting.

Deze tests zijn bedoeld om een indicatie te geven van de gevoeligheid van de voetgangersbrug voor mens-geïnduceerde trillingen. De waargenomen versnellingen zijn een indicatie van de gevoeligheid, maar de absolute versnellingswaarden zijn niet representatief voor het comfort onder normale omstandigheden aangezien de testen georkestreerde gebeurtenissen zijn met een synchronisatie. In dit geval werd tijdens alle gesynchroniseerde gebeurtenissen de eerste modus (verticale buigmodus van de overspanning van 17,76 m) of de derde modus (verticale buigmodus van de overspanning van 14,68 m) beoogd. Bij het evalueren van de versnellingen die tijdens deze tests zijn waargenomen met behulp van de comfortlimieten die zijn gedefinieerd in de ontwerpgidsen, kan de volgende evaluatie worden gemaakt:

- Tijdens de tests met lopende personen worden middelmatige comfortniveaus in horizontale richting waargenomen, terwijl in verticale richting de versnellingsniveaus onder de limiet voor minimaal comfort blijven.
- Tijdens de tests met joggende personen worden onaanvaardbaar hoge trillingsniveaus bereikt.
- Tijdens de proeven met springende personen werden onaanvaardbare trillingen in horizontale en verticale richting waargenomen.

Er dient opgemerkt te worden dat comfortlimieten voor trillingen die door de ontwerpgidsen worden geboden zijn bedoeld voor de evaluatie van de structurele trillingsrespons voor het belastingstype wandelen voor verschillende voetgangersdichtheden. Aangezien joggen en hardlopen kortdurende evenementen zijn, moeten andere en minder strikte comfortlimieten toegepast worden. Tot op heden zijn er geen versoepelde richtlijnen beschikbaar voor dergelijke comfortlimieten.

4 BELASTINGSPROEF TREMELO

In dit hoofdstuk worden de proeven op de composietbrug gelegen langs het jaagpad in Tremelo over de Laak, een zijrivier van de Dijle, besproken. Deze brug werd opgeleverd in 2018. De brug is een lage caissonligger uit GVVK en heeft een enkele isostatische overspanning van 10,4 m en een nuttige breedte van 3 m. De brug werd gedimensioneerd aan de hand van de belastingsgevallen gedefinieerd in EN1991 met een gelijkmatig verdeelde belasting van $4,9 \text{ kN/m}^2$, een geconcentreerde belasting van 10 kN en een dienstvoertuig met twee aslasten van 25 kN.

De maximale belastingen op de brug worden echter beperkt door de onderbouw. De maximale belasting per landhoofd bedraagt ongeveer 55 kN. Dit betekent dat de verdeelde belasting op de brug moet beperkt worden tot 3 kN/m^2 . Het voertuig van 5 ton (twee aslasten van 25 kN) kan in het kader van de proefbelasting op de brug gesimuleerd worden aan de hand van vier IBC watervaten. In de praktijk zal de brug echter enkel mogen belast worden met voertuigen met een maximumgewicht van 3,5 ton.

4.1 Belastingsprogramma

In overleg met de aanbestedende overheid, het departement Mobiliteit en Openbare Werken (MOW) Expertise Beton & Staal (EBS), de opdrachtnemer en ATO werden drie belastingsfasen voorgesteld voor de statische belastingsproeven, zoals weergegeven in Figuur 2.

- Belastingsfase 1: Belasting van 3,5 ton door middel van vier gedeeltelijk gevulde IBC watercontainers (100x120 cm) op een door de opdrachtnemer aangeleverd raamwerk steunend op vier blokken (25x25 cm) in het midden van de overspanning. Opvulling met water wordt bepaald door de opdrachtnemer in functie van het tarragewicht van de containers en het gewicht van het raamwerk;
- Belastingsfase 2: Belasting van 5 ton bestaande uit vier puntlasten van 1250 kg door middel van acht gedeeltelijk gevulde IBC watervaten (100x120 cm) op een door de opdrachtnemer aangeleverd raamwerk steunend op vier blokken (25cm x 25cm) in het midden van de overspanning. Opvulling met water wordt bepaald door de opdrachtnemer in functie van het tarragewicht van de containers en het gewicht van het raamwerk;
- Belastingsfase 3: Verdeelde belasting van 312 kg/m^2 door middel van stalen rijplaten in pakketten van vier stuks ($1,4 \times 5 \text{ m} - 78 \text{ kg/m}^2$) ondersteund door houten multiplexplaten over de volledige overspanning van de brug.



Figuur 2: Foto's van de uitvoering van de drie belastingsfasen voor de belastingsproef op de composietbrug in Tremelo

Tijdens de metingen wordt gebruik gemaakt van het meetrooster in Figuur 3, waarbij de meetpunten (MP) W langs de rand van het brugdek zijn aangebracht en de meetpunten F langs de centrumlijn van de brug.



Figuur 3: Meetrooster en positionering van de meetpunten voor de opmeting van de doorbuiging tijdens de belastingsproef op de composietbrug in Tremelo

4.2 Theoretisch berekende vervorming

Het gedrag van de brug gedurende de statische belastingsproef is volgens de producent van de composietbrug onderhevig aan kruip (blijvende plastische vervorming onder belasting die toeneemt met de duur van de belasting). Het te verwachten gedrag is als volgt:

- Doorbuigingen zoals hierna aangegeven zijn initiële doorbuigingen exclusief kruip;
- De eerste meting dient zo snel mogelijk na het aanbrengen van de belasting uitgevoerd worden, waardoor 10 minuten wachten voor het zetten van de belasting niet noodzakelijk is;
- Na verloop van tijd zal kruip van de brug optreden. Echter zal het binnen het korte tijdsbestek van de statische belastingsproef (1 dag) niet mogelijk zijn om op basis van meerdere metingen een inschatting te maken over kruip op lange termijn;
- Na ontlasten van de brug zal de initiële doorbuiging direct verdwijnen, terwijl eventueel optredende kruip blijvende zal zijn voor de volledige levensduur van de brug. Na ontlasting kan dus direct de nulmeting voor de volgende proefbelasting plaats vinden. Het verschil tussen de verschillende nulmeting en de initiële nulmeting zal een indicatie geven over de kruip die tijdens de statische belastingsproef in het composietmateriaal is opgetreden.

4.3 Opgemeten doorbuiging

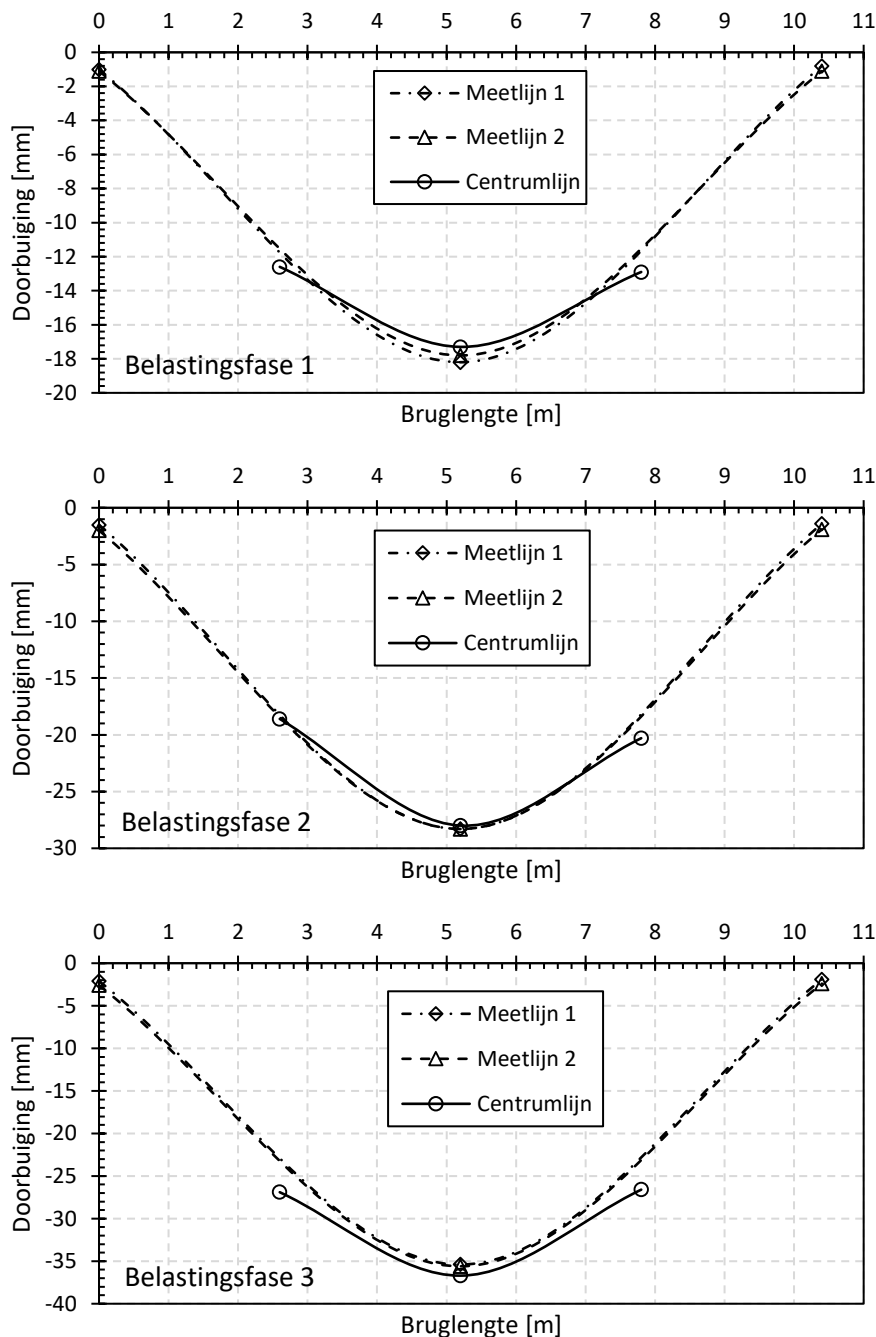
Een overzicht van de theoretische berekende doorbuiging en de opgemeten doorbuiging tijdens de d0.e belastingsproef voor de drie belastingsfasen wordt in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 4: Theoretisch berekende en opgemeten doorbuiging van de composietbrug in Tremelo

Belastingsfase	Theoretische doorbuiging	Opgemeten doorbuiging	Verhouding opgemeten t.o.v. theoretische doorbuiging
	[mm]	[mm]	[%]
1	27,0	18,2	67,4
2	40,0	28,3	70,8
3	54,0	36,7	68,0

De opgemeten werkelijke doorbuigingen situeren zich op gemiddeld 68,7% van de theoretische berekende waarden van de fabrikant van de composietbrug. Hierbij dient wel rekening gehouden te worden met de inachtneming van materiaal- en conversiefactoren die de effecten van de ouderdom en de omgevingsomstandigheden in rekening brengen en die de stijfheid van de brug drastisch verminderen in de ontwerpberekening van de composietbrug. De gebruikte conversiefactoren zijn onbekend. Wordt met een verhouding van 1,23 (zie Whitepaper 'Ontwerpmethodes en softwarematige analysetechnieken') tussen de initiële en gereduceerde materiaaleigenschappen gerekend, dan wordt het hiervoor berekende gemiddelde gelijk aan 84,8%.

De grafieken in Figuur 4 geven de doorbuiging voor de verschillende meetpunten aanwezig op het brugdek tijdens de belastingsproef voor de drie belastingsfasen. Hierbij komt meetlijn 1 overeen met de meetpunten W6-W5-W4, meetlijn 2 met de meetpunten W3-W2-W1 en de centrumlijn met de meetpunten F3-F2-F1.



Figuur 4: Grafische weergave van de doorbuiging van de composietbrug in Tremelo voor de drie belastingsfasen en langs meetlijn 1, meetlijn 2 en de centrumlijn

5 BELASTING- EN KRUIPPROEF CANADABRUGGEN

In totaal werden drie statische belastingsproeven uitgevoerd op de Canadabruggen te Brugge. In de eerste plaats heeft MOW-EBS een belastingsproef met behulp van een verreiker van 5,32 ton uitgevoerd op de (westelijke) stroomafwaartse composieten Canadabrug op 7 maart 2019. Vervolgens werden door WTCB vervolproeven uitgevoerd aan de hand van gedeeltelijk gevulde IBC watervaten

op de (oostelijke) stroomopwaartse Canadabrug gedurende de periode van 15 tot 22 juni 2020. In het vervolg worden beide proefcampagnes opgesplitst.

De fiets- en voetgangersbrug, opgeleverd in 2019 in opdracht van de Vlaamse Waterweg, heeft een brugdek uit GVVK met een totale lengte van 40,44 m en is hyperstatisch met drie overspanningen met respectievelijk een lengte van 14,68, 8,00 en 17,76 m. De nuttige breedte van de composietbrug bedraagt 3,83 m.

5.1 Belastingsproef westelijke Canadabrug (MOW)

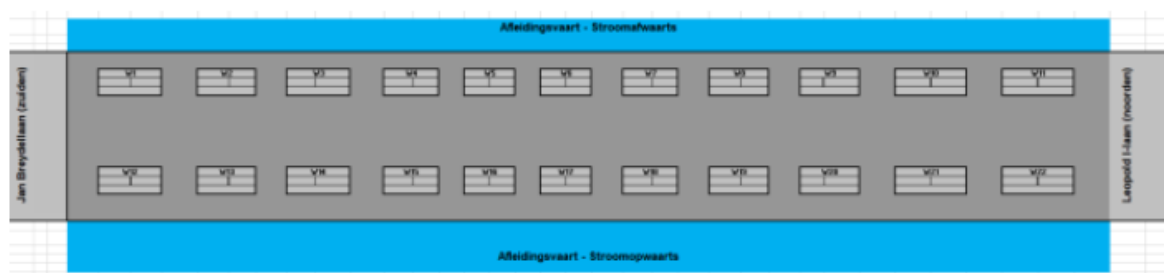
In overleg met de aanbestedende overheid, MOW-EBS, opdrachtnemer en ATO worden in totaal drie belastingsfasen vooropgesteld.

- Belastingsfase 1: Belasting van het dienstvoertuig in het midden van de overspanning aan de kant van de Bevrijdingslaan;
- Belastingsfase 2: Belasting van het dienstvoertuig in het midden van de overspanning langs de Maria Bourgondiëlaan;
- Belastingsfase 3: Belasting van het dienstvoertuig excentrisch op de overspanning langs de Maria Bourgondiëlaan.



Figuur 5: Foto van de uitvoering van de belastingsproef met het 5,32 ton dienstvoertuig op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge

Het meetrooster in Figuur 6 wordt gehanteerd en is gebaseerd op de 22 reeds tijdens de productie voorziene verkenmerken op het brugdek.



Figuur 6: Gehanteerde meetrooster en positionering van de verkenmerken tijdens de belastingsproef op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge

5.1.1 Theoretisch berekende doorbuiging

De theoretische berekening van de doorbuiging van de Canadabruggen werd uitgevoerd aan de hand van SCIA Engineer door MOW-EBS. De resultaten van de berekeningen met de bouwkundige rekensoftware kan teruggevonden worden in de volgende tabel.

5.1.2 Opgemeten doorbuiging

Een overzicht van de theoretische berekende doorbuiging en de opgemeten doorbuiging tijdens de belastingsproef voor de drie belastingsfasen wordt in de onderstaande tabel weergegeven.

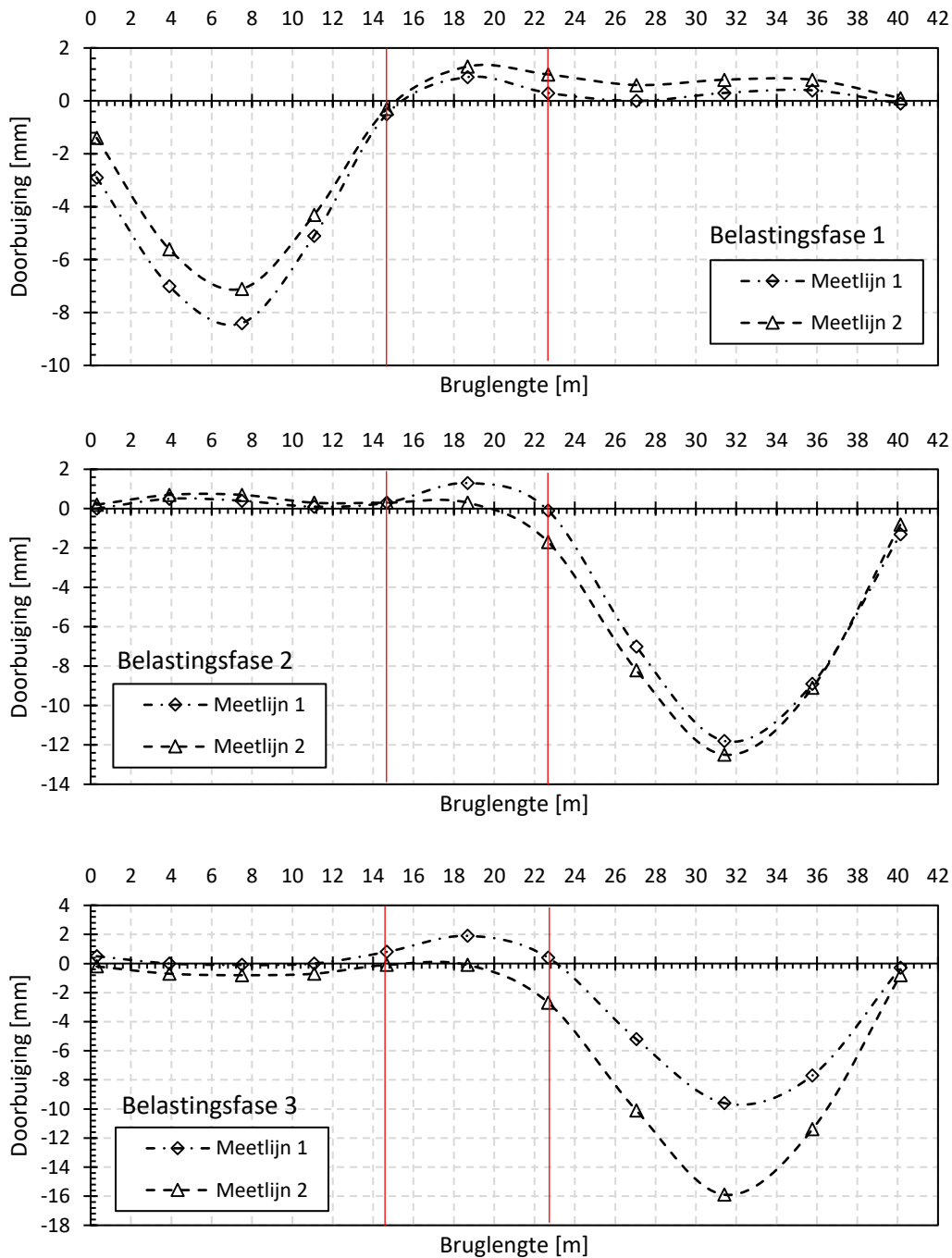
Tabel 5: Theoretisch berekende (SCIA Engineer) en opgemeten doorbuiging tijdens de belastingsproef op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge

Belastingsfase	Theoretische doorbuiging [mm]	Opgemeten doorbuiging [mm]	Verhouding opgemeten t.o.v. theoretische doorbuiging [%]
1	6,3	8,4	133,3
2	11,1	12,5	112,6
3	13,6	15,9	116,9

Het is belangrijk op te merken dat de theoretische doorbuigingen in Tabel 5 zijn berekend op basis van de niet gereduceerde stijfheidswaarden. Er zijn dus geen conversie- en materiaalfactoren toegepast.

De grafieken in Figuur 7 geven de doorbuiging voor de verschillende meetpunten aanwezig op het brugdek tijdens de belastingsproef voor de drie belastingsfasen. Hierbij komt meetlijn 1 overeen met de meetpunten W1-W11 en meetlijn 2 met de meetpunten W12-W22. De rode verticale lijnen op de grafieken geven de locaties van de tussensteunpunten in de lengterichting van de brug weer.

Er werd tijdens de belastingsproef vastgesteld dat de vier wielen van het dienstvoertuig hoogstwaarschijnlijk alle vier een verschillende belasting uitoefenen en deze niet twee identieke aslasten vormen zoals vooropgesteld in het theoretische SCIA Engineer model. Het verschil in wiellasten is te wijten aan de excentrische positionering van de kraanarm ten opzichte van de langse as van het dienstvoertuig. De rechterwielen zijn hierdoor zwaarder belast dan de linkerwielen. Deze excentriciteit in de belasting van het dienstvoertuig kan tevens teruggevonden worden in de bovenstaande resultaten van de belastingsproef en verklaart waarom er bij een symmetrische belasting toch een licht verschil in doorbuiging is voor de beide meetlijnen.



Figuur 7: Opgemeten doorbuiging tijdens de belastingsproef op de stroomafwaartse Canadabrug te Brugge voor de drie belastingsfasen en meetlijn 1 en meetlijn 2

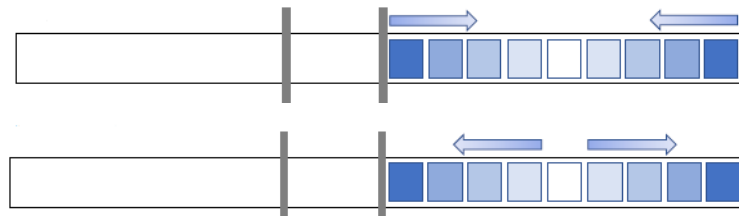
5.2 Belastings- en kruipproef oostelijke Canadabrug (WTCB)

5.2.1 Halflast statische belastingsproef

Binnen het TETRA onderzoeksproject C-Bridge werd een halflastproef uitgevoerd door WTCB op de stroomopwaartse Canadabrug te Brugge in samenspraak met MOW-EBS, De Vlaamse Waterweg, FiberCore Europe en UGent.

Voor de opmeting van de rekken wordt gebruik gemaakt van BOFDA (Brillouin Optical Frequency-Domain Analysis) en FBG (Fiber Bragg Grating) optische sensoren.

Voor de halflastproef werd een semi-verdeelde belasting aangebracht op de brug door middel van 32 IBC watervaten. De belasting werd in vijf belastingsstappen aangebracht. Allereerst werden de lege watervaten op de brug aangebracht gecentreerd ten opzichte van de centrumlijn van de brug. Er werd vervolgens een nulmeting uitgevoerd voor de BOFDA-meetlijn. Gelijktijdig werd de brug ook nauwkeurig topografisch opgemeten. De watervaten werden vervolgens in vier belastingsstappen (25, 50, 75 en 100%) gevuld tot de halflast werd bereikt volgens de vulprocedure in Figuur 8. Bij het bereiken van de halflast werd de brug nogmaals nauwkeurig topografisch opgemeten. Het WTCB installeerde tevens zes bijkomende prisma's aan één zijde van de brug waarvan de posities semi-continu werden uitgelezen via een totaalstation gedurende de ganse duur van de halflastproef. Vijf van deze zes prisma's werden op de rand van het dek bevestigd en het zesde aan het uiteinde van de brug op de handleuning, aan de zijde van de Maria van Bourgondiëlaan. Dit laatste meetpunt werd bevestigd op de handleuning omdat het uiteinde van het dek niet zichtbaar was vanuit de positie van het totaalstation door allerlei begroeiingen. In Figuur 9 kunnen de positionering van de watervaten op het brugdek en de locaties van de vijf prisma's bevestigd op de rand van het dek gedurende de halflastproef herkend worden.

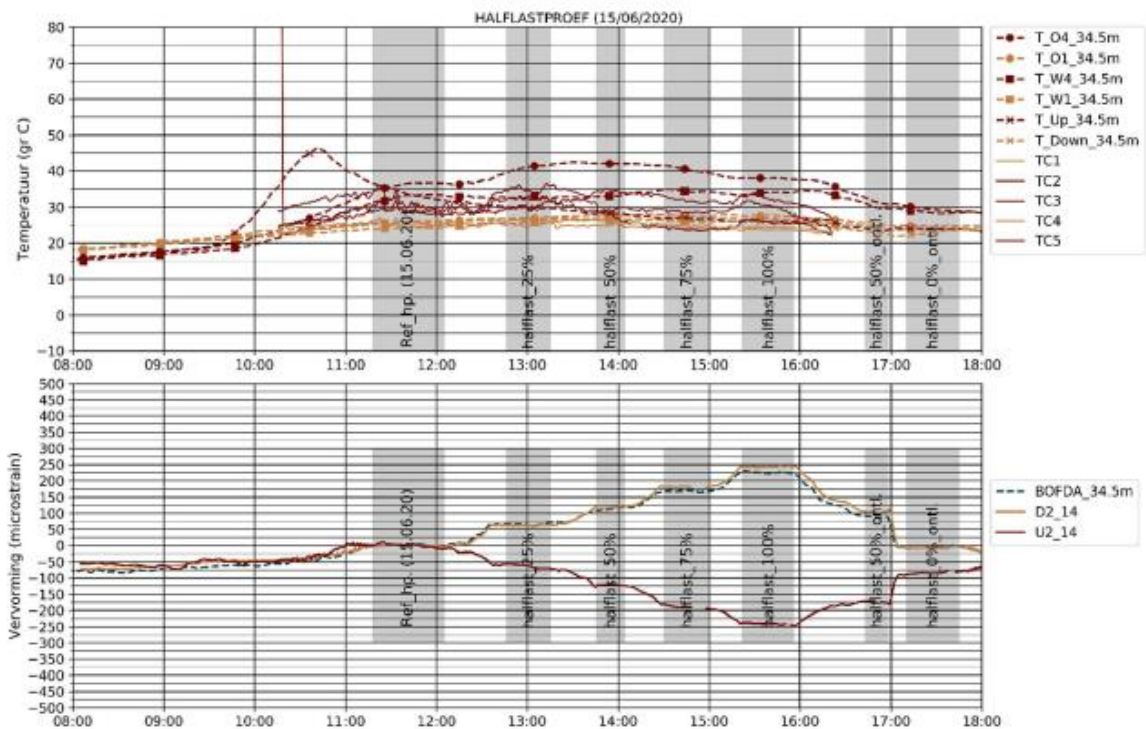


Figuur 8: Procedure voor het vullen (boven) en leegmaken (onder) van de watervaten op het brugdek

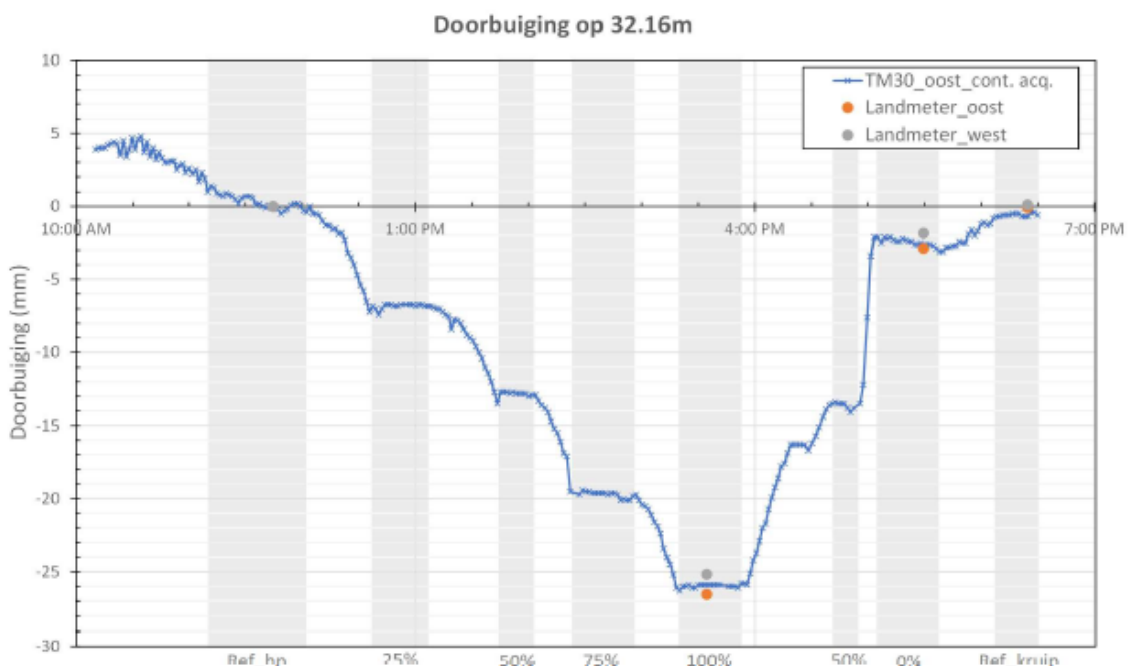


Figuur 9: Positionering van de 32 IBC watervaten op en de vijf prisma's langs de rand van het brugdek op de stroomopwaartse Candabrug te Brugge

In Figuur 10 wordt de evolutie van de absolute temperatuur (BOFDA en thermokoppels) en het rekverloop (BOFDA en FBG) in de brug weergegeven gedurende de halflastproef in functie van de tijd en dit in het midden van de overspanning aan de Maria van Bourgondiëlaan, respectievelijk op 34,5 m vanaf de Bevrijdingslaan. In de analyse van de halflastproef worden enkel de reële vervormingen in beschouwing genomen om de mogelijke lokale effecten van temperatuurschommelingen uit de resultaten te filteren. In Figuur 11 kunnen de doorbuigingsregistraties in het midden van de overspanning aan de Maria van Bourgondiëlaan door het semi-continue totaalstation en de punctuele topografische opmetingen teruggevonden worden.



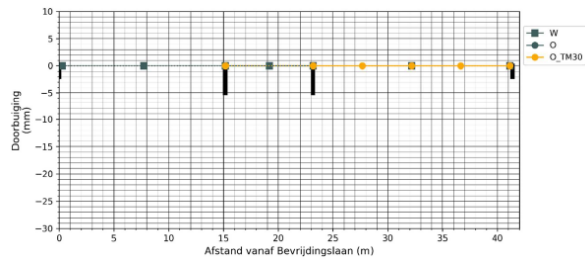
Figuur 10: Absolute temperatuur- (boven) en rekverloop (onder) opgemeten door BOFDA in functie van de tijd over de duur van de halflastproef in het midden van de overspanning van de stroomopwaartse Canadabrug aan de Maria van Bourgondiëlaan



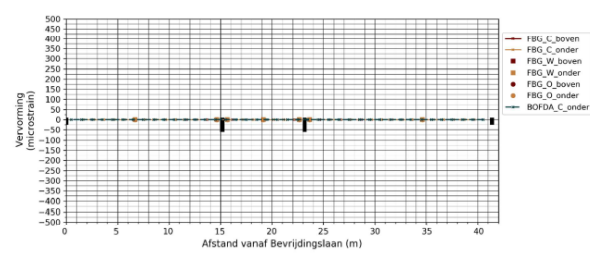
Figuur 11: Doorbuigingsverloop met semi-continu totaalstation en punctuele topografische opmetingen in functie van de tijd over de duur van de halflastproef in het midden van de overspanning van de stroomopwaartse Canadabrug aan de Maria van Bourgondiëlaan

In Figuur 12 worden de bekomen doorbuigingen en rekmetingen voor de verschillende belastings- en ontlastingsstappen weergegeven. De verschillende belastingsstappen worden tevens vergeleken met de theoretisch voorspelde waarden van de doorbuiging en de rek berekend aan de hand van de bouwkundige rekensoftware SCIA Engineer door UGent.

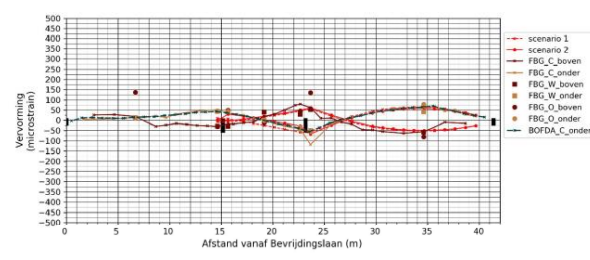
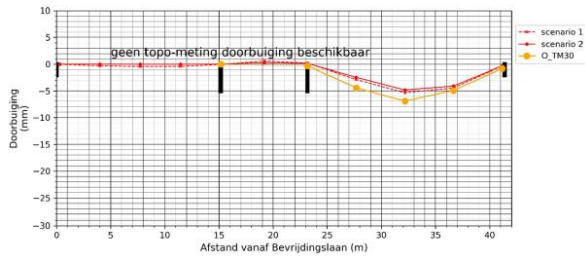
Doorbuiging



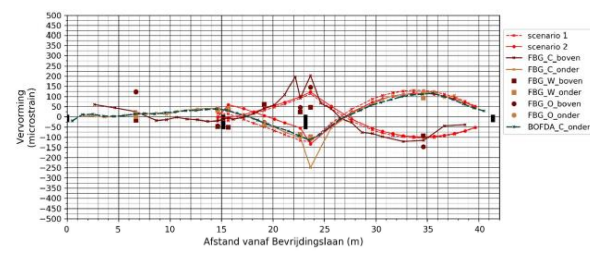
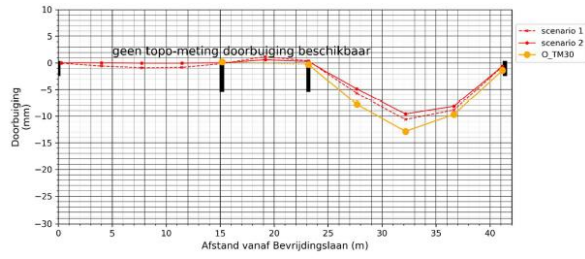
Rekken



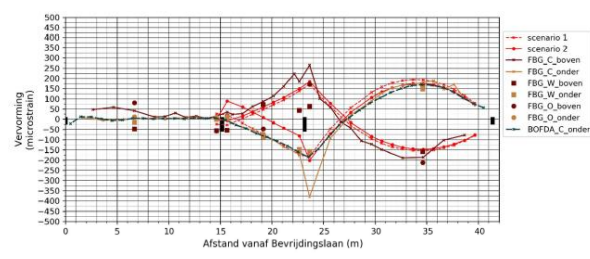
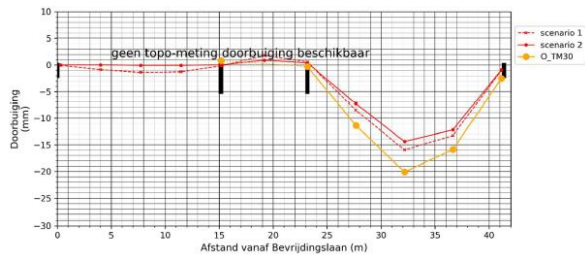
Referentiemeting 15/06/2020 11:18 – 12:05



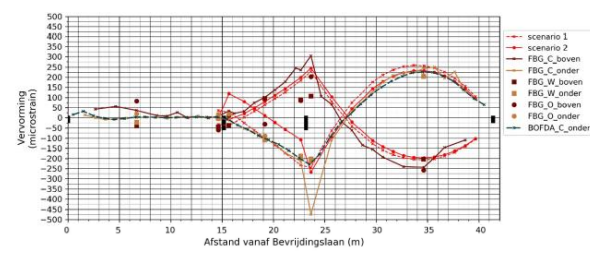
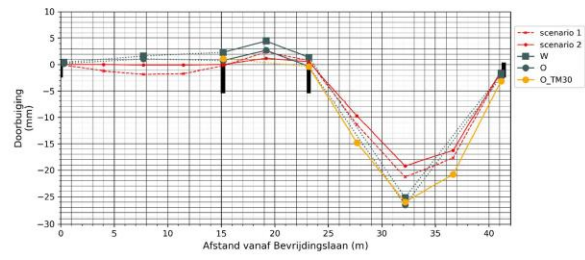
Halfast 25% belast 15/06/2020 12:46 – 13:15



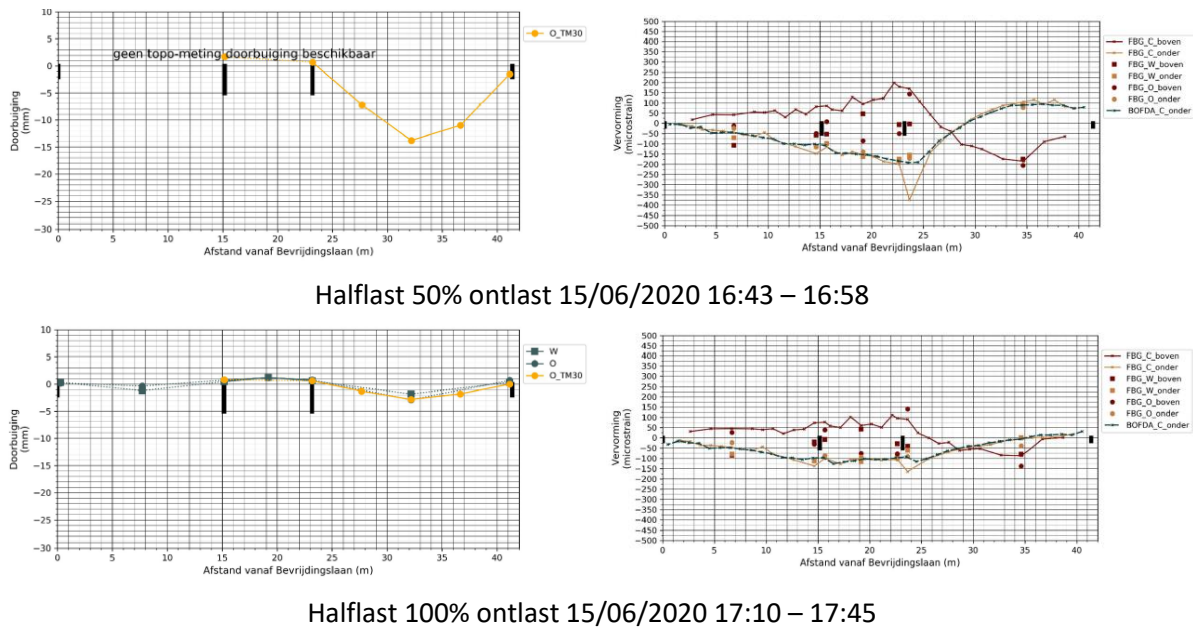
Halfast 50% belast 15/06/2020 13:45 – 14:04



Halfast 75% belast 15/06/2020 14:30 – 15:00



Halfast 100% belast 15/06/2020 15:22 – 15:56

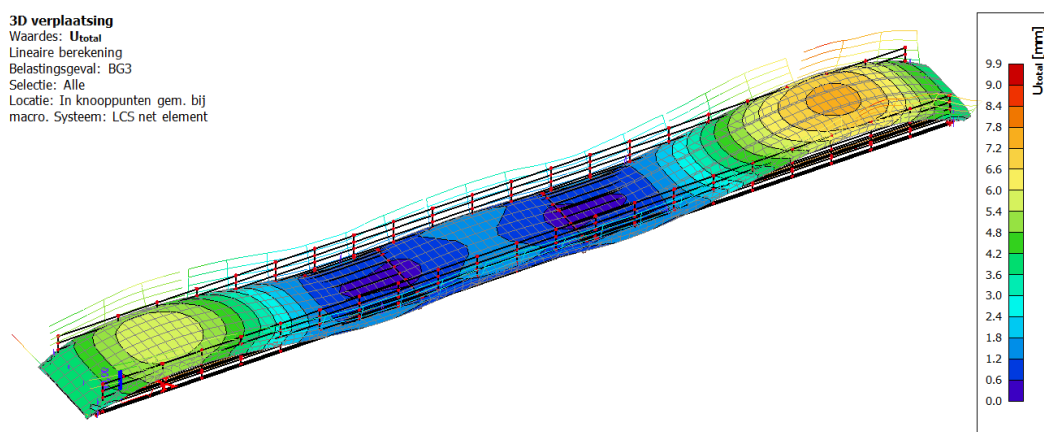


Figuur 12: Doorbuiging en rekken tijdens de belasting en ontlasting tijdens de halflastproef

De resultaten weergegeven in Figuur 10 en Figuur 11 vertonen geen noemenswaardige kruip tijdens de verschillende belastingstappen en de rekmetingen bij de verschillende beschouwde belastingstappen (Figuur 12) tonen over het algemeen een goede overeenstemming met de voorspellingen begroot door UGent, met een maximale afwijking kleiner dan 50 μ s (microstrain). De opgemeten doorbuigingen bij de verschillende belastingstappen (Figuur 12) vertonen wel een grotere afwijking met de voorspelde waarden, met $\pm 1,5$ mm (bij 25%) tot ± 5 mm (bij 100%) meer doorbuiging dan voorspeld door het theoretische scenario 1. Vermoedelijk kan een belangrijk deel van deze afwijking verklaard worden door de afkoeling van het bovendek ten opzichte van de referentiemeting door de plaatsing van de watervaten. De watervaten werpen immers een schaduw op het brugdek (richting het westen, zie Figuur 9), die voor een deel in de globale vervorming van de brug zichtbaar kan zijn.

De temperatuurwijziging ten gevolge van de watervaten kan duidelijk gezien worden in de temperatuurmetingen in Figuur 10. Tegen 9:00 registreren alle temperatuurskabels zowel in de boven- als onderflens van de brug een temperatuur van $\pm 17^\circ\text{C}$. Net voor het plaatsen van de vaten rond 10:30 is de temperatuur van de bovenflens door de bezonning reeds opgelopen tot $\pm 46^\circ\text{C}$. Tijdens de topografische referentiemeting net na de plaatsing van de lege watervaten op het dek daalt de temperatuur in de bovenflens sterk met meer dan 10°C tot een absolute temperatuur van $\pm 34^\circ\text{C}$. Over de verschillende belastingstappen heen koelt de bovenflens van de brug langzaam verder af tot een absolute temperatuur van $\pm 25^\circ\text{C}$ wordt bereikt bij de volledige halflast (100%).

Gebaseerd op de metingen van de halflastproef werd door UGent een inschatting gegeven van de omvang van het temperatuur-effect op de doorbuiging van de composieten stroomopwaartse Canadabrug te Brugge. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de bouwkundige rekensoftware SCIA Engineer en het reeds gebruikte model voor de inschatting van de doorbuiging en de rekken tijdens de halflastproef. In het model werd gebruik gemaakt van een temperatuurverschil van 40°C tussen de boven- en onderflens. De bekomen vervorming van het brugdek wordt in Figuur 13 weergegeven. Er kan gezien worden dat een opbolling van 7,5 mm bekomen wordt ter plaatse van de overspanning aan de Maria van Bourgondiëlaan (rechts op de figuur). Het verschil van 5 mm bij 100% halflast tussen de opgemeten waarden van de doorbuiging en de theoretisch berekende waarde kan grotendeels verklaard worden door het temperatuur-effect dat zich voordoet in composieten brugdekken bij rechtstreekse bezonning.



Figuur 13: Theoretisch berekend temperatuurseffect op de stroomopwaartse Canadabrug te Brugge bij een temperatuurverschil van 40°C tussen de boven- en onderflens

De BOFDA-meting centraal onderaan in de brug geeft over het algemeen zeer vergelijkbare resultaten met de FBG-sensoren, die zich op dezelfde locatie in de sectie bevinden. Dit bevestigt dat beide meettechnieken dezelfde resultaten opleveren (zie Figuur 12). Evenwel kan een significante afwijking vastgesteld worden in de FBG-meting ter hoogte van het tussensteunpunt aan de zijde van de Maria van Bourgondiëlaan. Gegeven dat de belasting op de overspanning aan de Maria van Bourgondiëlaan is gepositioneerd, ondervindt dit tussensteunpunt de grootste dwarskrachten en kunnen lokale spanningsconcentraties ten gevolge van de niet optimale oplegging zich voordoen. Aangezien de FBG-sensoren een zeer lokale meting kunnen weergeven terwijl de BOFDA sensoren zowel spatiaal als in de tijd een meer uitgesmeerde meting geven, kan dit verklaren waarom de lokale spanningsconcentraties enkel opgepikt worden door de FBG-sensor.

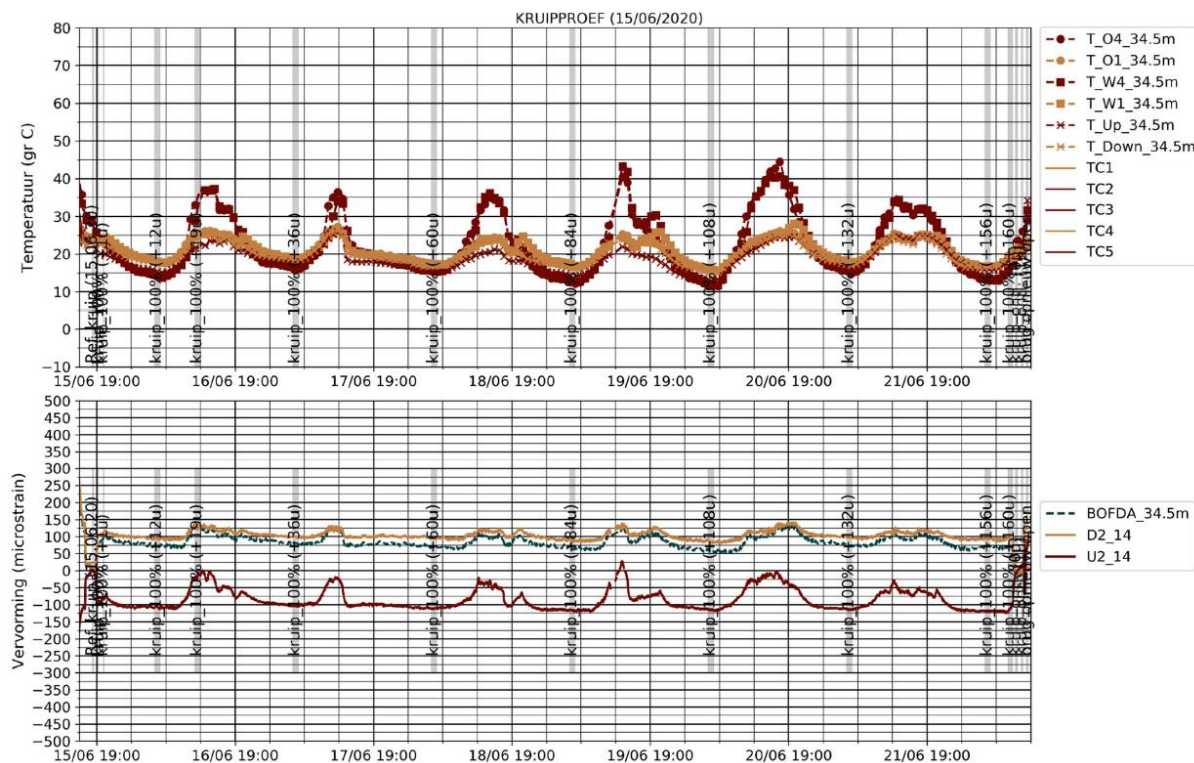
5.2.2 Kwartlastkruipproef

Naast de reeds beschreven halfstapproef werd tevens een kwartstapkruipproef uitgevoerd op de stroomopwaartse Canadabrug. Voor deze proef werd net zoals voor de halfstapproef een semi-verdeelde belasting aangebracht op de brug door middel van IBC watervaten, zoals weergegeven in Figuur 15. De kruipproef werd aansluitend op de halfstapproef uitgevoerd. Tussen beide proeven werd evenwel voldoende tijd gelaten aan de brug om terug te komen tot haar initiële positie en vervolgens werd een nulmeting uitgevoerd met de 16 lege watervaten op het brugdek.



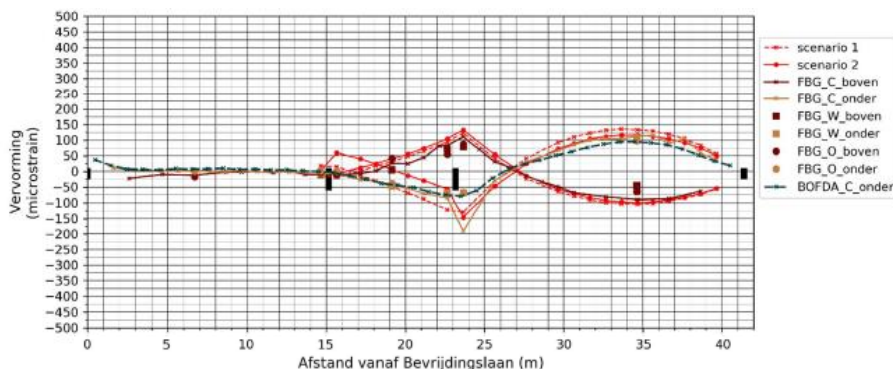
Figuur 14: Kwartstapkruipproef op stroomopwaartse Canadabrug te Brugge

De kwartstapkruipproef werd opgestart op 15 juni en werd afgerond op 22 juni 2020. In Figuur 15 wordt de evolutie van de temperatuur (BOFDA en thermokoppels) en vervorming (BOFDA en FBG) in de brug weergegeven in functie van de tijd en dit in het midden van de overspanning aan de kant van de Maria van Bourgondiëlaan op respectievelijk 34,5 m vanaf de Bevrijdingslaan.

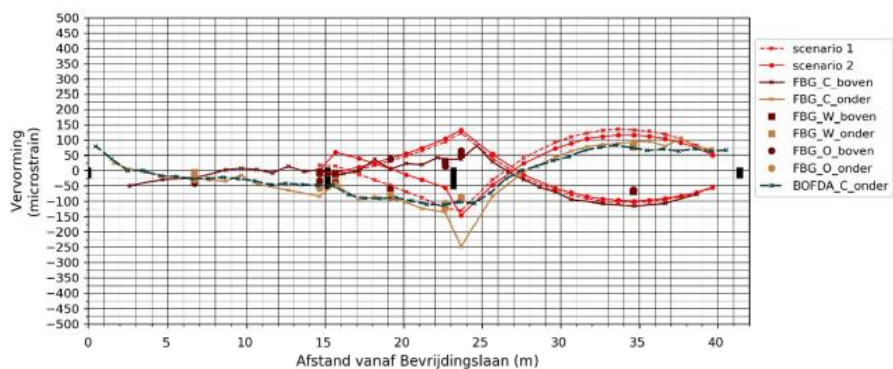


Figuur 15: Temperatuur- en rekverloop in functie van de tijd over de duur van de kwartlastproef

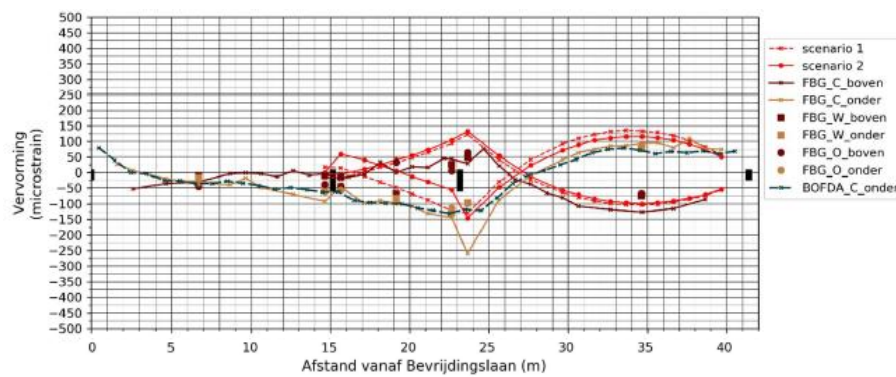
In Figuur 16 worden de bekomen rekmetingen 1 uur, 12 uur en 156 uur na het aanbrengen van de kruipbelasting ten opzichte van de referentiemeting vergeleken met voorspellingen van UGent (scenario 1 en 2).



Kruipproef 100% belast 1 uur



Kruipproef 100% belast 12 uur



Kruipproef 100% belast 156 uur

Figuur 16: Rekverloop in de draagrichting van de brug t.o.v. de referentiemeting

De resultaten weergegeven in Figuur 15 en Figuur 16 vertonen geen noemenswaardige kruip tijdens de gehele duur van de kruipproef. In de voorspelling van UGent wordt gewag gemaakt een totale kruip van ongeveer 6%, wat neerkomt op een variatie in de rek van grootteorde $10 \mu\text{s}$ bij de beschouwde kruipbelasting. De temperatuurvariaties dag/nacht zijn prominenter, zoals ook duidelijk kan gezien worden in Figuur 15 met variaties in rek dag/nacht van 100 tot $150 \mu\text{s}$. Ook na het ontlasten van de brug veert de brug vrijwel direct terug naar haar oorspronkelijke positie.

6 CONCLUSIE

Structurele parameters zoals de sterkte, de stijfheid en de trillingsdemping zijn voor composietbruggen niet zo eenvoudig uit klassieke materiaaltesten zoals een drukproef op een betonkubus of een trekproef op wapeningsstaal te bepalen. De basisgegevens van sterkte en stijfheid van het hars en de vezels zijn bekend maar het oneindige aantal combinaties van deze twee materialen in massaverhouding en vezelrichtingen laat alleen een voorspelling toe van de eigenschappen van het uiteindelijke composiet. Het is in de composietsector niet gebruikelijk om testen te eisen op het materiaal, dat enkel in exact dezelfde samenstelling beschikbaar is in de brug zelf. Stijfheid en trillingsgedrag worden typisch gemeten op de volledige constructie, 'as built' of voorafgaand aan de plaatsing aan de hand van opleveringsproeven.

Deze whitepaper beschrijft de uitvoering van verschillende opleveringsproeven uitgevoerd op diverse composietbruggen in Vlaanderen. Hiertoe behoren statische belastingsproeven ter bepaling van de stijfheid en, indien er interne sensoren aanwezig zijn in het brugdek, de inwendige spanningen (rekken). Er dient hierbij opgemerkt te worden dat de temperatuur en de rechtstreekse bezonning op het composietbrugdek een niet te verwaarlozen effect hebben op de resultaten van de doorbuigingsmetingen.

Daarnaast kan ook het dynamisch gedrag, onder meer aan de hand van de eigenfrequenties en de structurele dempingsverhouding, van de composietbrug 'in situ' bepaald worden aan de hand van trillingsproeven, die zowel uitgevoerd kunnen worden met een grote hoeveelheid aan zeer nauwkeurige tri-axiale versnellingsensoren of door gebruik te maken van de interne versnellingsensoren van de smartphone.

De resultaten geven inzicht in de huidige state-of-the-art met betrekking tot opleveringsproeven op composietbruggen in Vlaanderen en verschaffen daarnaast ook experimentele input voor de validatie van de bestaande ontwerpmethodiek.