



# Ontwerpmethodes en softwarematige analysetechnieken

TETRA project C-Bridge

Deze whitepaper werd opgesteld in het kader van het TETRA project C-Bridge en geeft de analytische berekeningswijze van een vezel-versterkte kunststoffen fietsers- en voetgangersbrug aan de hand van een rekenvoorbeeld. CUR96:2019 wordt als basis gebruikt voor de berekening. De materiaaleigenschappen van de laminaten in het brugdek worden berekend volgens de klassieke laminaattheorie. Aan het einde wordt de berekeningswijze geïntegreerd in een Excel rekentool, die een eerste inschatting maakt van het materiaalgebruik voor een composietbrug met bepaalde randvoorwaarden en afmetingen.



## 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

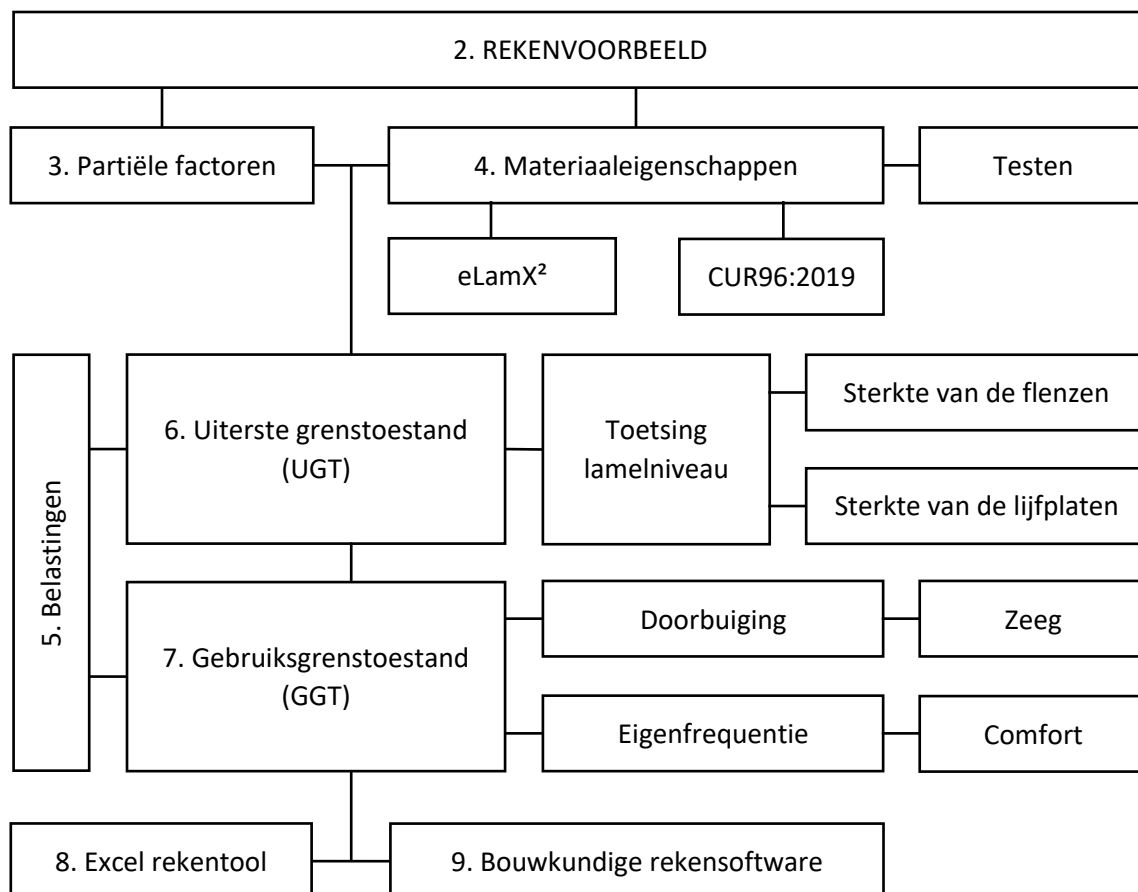
1	Rekenvoorbeeld .....	6
2	Partiële factoren.....	8
2.1	Materiaalfactor.....	8
2.2	Conversiefactor .....	9
3	Materialen .....	12
3.1	Materiaaleigenschappen.....	12
3.2	Lameleigenschappen.....	14
3.3	Laminaateigenschappen.....	15
3.4	Doorsnede-eigenschappen.....	21
3.5	Testen .....	22
4	Belastingen .....	23
4.1	Permanente belasting .....	23
4.2	Tijdelijke belasting.....	24
4.3	Buitengewone belasting.....	24
4.4	Belastingscombinaties.....	25
5	Uiterste grenstoestand (UGT) .....	25
5.1	Sterkte .....	25
5.2	Stabiliteit van de lijfplaten.....	30
5.3	Vermoeiing .....	31
5.4	Robuustheid .....	34
6	Gebruiksgrenstoestand (GGT).....	34
6.1	Doorbuiging .....	34
6.2	Zeeg .....	36
6.3	Eigenfrequentie .....	37
6.4	Comfort .....	39
7	Excel rekentool .....	41
7.1	Bereik en doelstelling van de rekentool.....	41
7.2	Aangenomen dwars- en langsdoorsnede.....	42
7.3	Gebruik van de rekentool: 'Input - Output'-tabblad .....	43
7.4	Optimalisatie .....	48
8	Uitwerking van twee representatieve cases met rekentool .....	49
8.1	Fietsostrade F18, Puurs .....	49
8.2	Fietsostrade F11, Mortsel.....	50

---

9	Bouwkundige rekensoftware .....	52
9.1	Buildsoft Diamonds .....	53
9.2	SOFiSTiK .....	53
9.3	SCIA Engineer .....	53
9.4	Samenvatting en vergelijking .....	69
10	Conclusie .....	69
	Referenties .....	71
	Lijst met figuren.....	72
	Lijst met tabellen.....	73

## INLEIDING

Volgende figuur geeft een grafische voorstelling van de onderlinge samenhang van de verschillende hoofdstukken en onderdelen van deze whitepaper. Deze zal tevens gebruikt worden als leidraad voor het doorlopen van de analytische berekening.



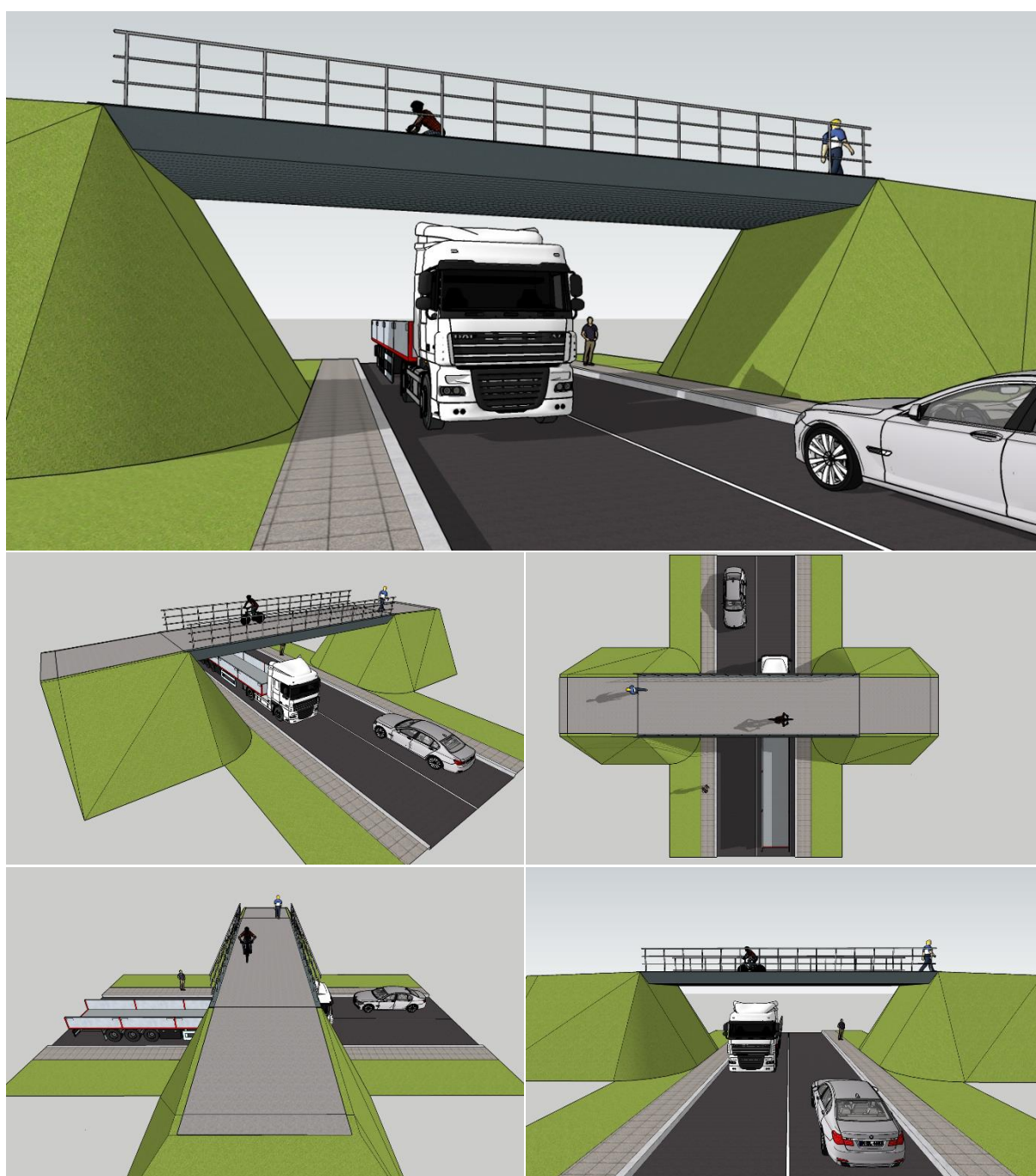
De whitepaper bespreekt de analytische berekening van een fietsers- en voetgangersbrug vervaardigd uit een vezelversterkte kunststof aan de hand van een rekenvoorbeeld voor een realistische situatie. In dit rekenvoorbeeld zal de CUR96:2019 gebruikt worden als basis voor de berekeningen. Hierbij zullen de verschillende hoofdstukken van de CUR-aanbevelingen overlopen en besproken worden in het licht van het rekenvoorbeeld. Meer informatie in verband met de CUR96:2019 kan teruggevonden worden in de whitepaper 'Richtlijnen en Normen', welke tevens uitgebracht is in het kader van het TETRA project C-Bridge.

De materiaaleigenschappen zoals de sterkte en stijfheid van de laminaten voor de verschillende onderdelen van het brugdek worden aan de hand van de klassieke laminaattheorie (KLT) berekend, welke buiten het bestek van deze whitepaper valt. Hiervoor wordt verwezen naar de literatuur en de whitepaper '*Kennisvergaring en vertaling (State of the Art)*' sectie '*1.5 Klassieke laminaattheorie*', tevens gepubliceerd in het kader van dit TETRA onderzoeksproject C-Bridge.

Aan het einde van deze whitepaper wordt de berekeningswijze geïntegreerd in een Excel rekentool die een eerste inschatting geeft van het materiaalgebruik voor een composietbrug met bepaalde afmetingen en randvoorwaarden (lengte, breedte, bouwhoogte, type oplegging, ...). Deze rekentool zal nadien vergeleken worden met bouwkundige rekensoftware (SCIA Engineer) en de resultaten zullen besproken worden.

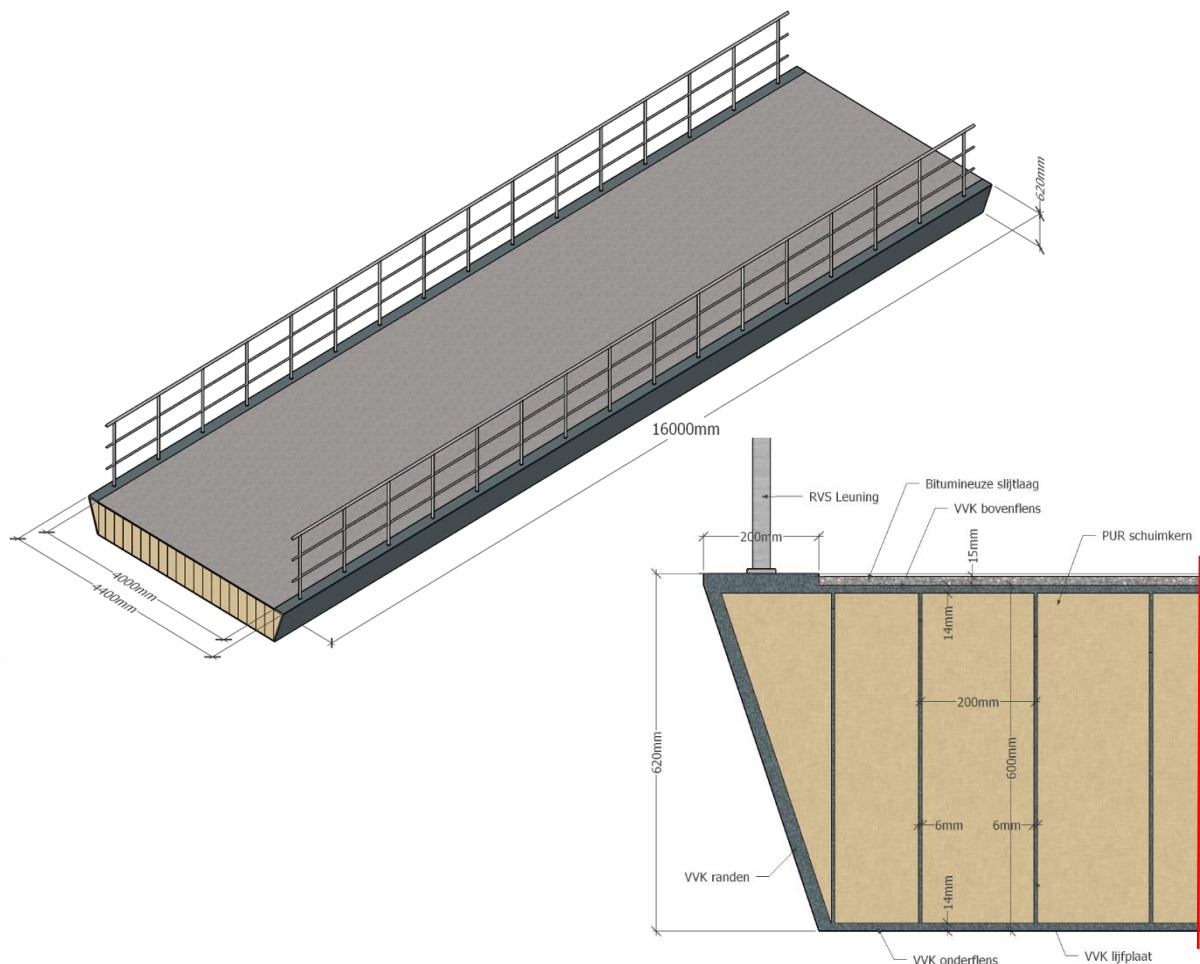
## 1 REKENVOORBEELD

In het rekenvoorbeeld zal een eenvoudig opgelegde vezelversterkte fietsers- en voetgangersbrug berekend worden, welke twee rijvakken en bijhorende voetpaden zal overbruggen. De rijvakken en voetpaden hebben respectievelijk een breedte van 3,5 m en 1,5 m. Het rijvlak van de fietsers- en voetgangersbrug bevindt zich 5 m boven de rijbaan om de doorgang van vrachtwagens onder de brug mogelijk te maken. Door de schuine helling van de landhoofden bedraagt de totale lengte van de fietsers- en voetgangersbrug 16 m, met een opleg van de brug aan elke kant van 0,2 m. De totale vrije overspanning, die berekend wordt als de afstand tussen de centrale punten van de opleggingen, bedraagt hierdoor 15,8 m. De dikte van het brugdek bedraagt 600 mm, wat neerkomt op een dikte-tot-overspanningsverhouding van ongeveer 1/26. Figuur 1 toont de VVK brug in dit rekenvoorbeeld.



Figuur 1: Grafische weergave van de desbetreffende situatie voor het rekenvoorbeeld

Het brugdek en een detail van de opbouw voor de bovenstaande brug zijn weergegeven in Figuur 2. Hierbij dient opgemerkt te worden dat deze figuren louter bedoeld zijn de gangbare vorm van een composietbrug en de daaruit volgende structurele algemene werking weer te geven. De weergegeven constructiedetails, zoals de verankering van de leuning, dienen niet zonder meer overgenomen te worden in een ontwerp, maar vereisen in werkelijkheid een nadere uitwerking, wat buiten het bereik van deze whitepaper valt.



**Figuur 2: Weergave van het composieten brugdek voor de fietsers- en voetgangersbrug**

De fietsers- en voetgangersbrug heeft een breedte van 4,4 m met aan beide zijden een vrijgehouden breedte van 20 cm ter bevestiging van de leuning. De nuttige breedte van de brug bedraagt hierdoor 4 m.

Het brugdek voor de fietsers- en voetgangersbrug bestaat uit een sandwichconstructie met een boven- en onderflens van glasvezelversterkt polyester met elk een dikte van 14 mm. De flenzen worden onderling met elkaar verbonden door middel van de lijven, welke een dikte van 6 mm hebben en een onderlinge hart-op-hartafstand van 20 cm. De schuine zijranden van het brugdek worden versterkt om de lokale krachtsinvoer te nemen. De dikte van de zijranden bedraagt daarom 25 mm en zal meegenomen worden in de berekening van het eigengewicht van het brugdek en bij de bepaling van het traagheidsmoment en bijgevolg de buigstijfheid van het brugdek. De verankering van de leuning aan het brugdek zal in het verdere verloop van de whitepaper niet besproken worden. Als laatste wordt de slijtlaag bovenop het brugdek gedefinieerd met een dikte van 15 mm, welke tevens meegenomen wordt in de berekening van de permanente belasting van het brugdek. De gangbare vorm en de structurele algemene werking

Hieronder worden de gegevens samengevat in Tabel 1 met de bijhorende symbolen die gebruikt zullen worden in het verdere verloop van deze whitepaper.

**Tabel 1: Geometrische eigenschappen van het composieten brugdek**

Beschrijving	Symbol	Waarde	Eenheid
Lengte brug	$L_{brug}$	16,0	m
Breedte brug	$B_{brug}$	4,4	m
Lengte oplegging	$L_{opl}$	0,2	m
Breedte vrijgehouden voor leuning	$B_{ing}$	0,2	m
Vrije overspanning	$L_{span}$	15,8	m
Nuttige breedte	$B_{nut}$	4,0	m
Dikte brugdek	$H_{brug}$	0,6	m
H.o.h. afstand lijfplaten	$h_{of}h_{lf}$	0,2	m
Oppervlakte brugdek	$A_{brug}$	70,40	m <sup>2</sup>
Hoek van zijranden met horizontale	$\alpha$	72	°
Dikte bovenflens	$t_{bf}$	14	mm
Dikte onderflens	$t_{of}$	14	mm
Dikte lijfplaten	$t_{lf}$	6	mm
Dikte zijranden	$t_{zr}$	25	mm
Dikte slijtlaag	$t_{slijt}$	15	mm

De ontwerplevensduur voor de brug bedraagt 100 jaar en de gevolgklasse is CC1, welke beiden door EC 1990 gedefinieerd worden.

## 2 PARTIËLE FACTOREN

De partiële factoren zijn uitsluitend van toepassing op laminaten opgebouwd uit glas- en/of koolstofvezels en een thermohardende matrix van onverzadigd polyester-, vinylester- of epoxyhars.

De rekenwaarde van de weerstand  $R_d$  en van een materiaal- of producteigenschap  $X_d$  moet worden berekend met volgende formule. Meer informatie hierover kan teruggevonden worden in de whitepaper in verband met de normering voor composietstructuren.

$$R_d = \frac{\eta_c \cdot R_k}{\gamma_M} \qquad X_d = \frac{\eta_c \cdot X}{\gamma_M}$$

Met:

$R_k$  Karakteristieke waarde van de specifieke weerstand

$X$  Is  $X_k$  of  $X_n$ , welke respectievelijk de karakteristieke waarde of de nominale waarde is van de materiaal- of producteigenschap

$\eta_c$  Conversiefactor

$\gamma_M$  Partiële materiaalfactor

### 2.1 Materiaalfactor

Voor het toetsen van de uiterste grenstoestanden van VVK constructies moet de materiaalfactor  $\gamma_M$  worden berekend volgens:



$$\gamma_M = \gamma_{M1} \cdot \gamma_{M2}$$

Met:

- $\gamma_{M1}$  Partiële materiaalfactor, gekoppeld aan de geometrische afwijkingen en modelonzekerheden en afhankelijk van de manier waarop de lamel- of laminaateigenschappen bepaald of afgeleid worden
- $\gamma_{M2}$  Partiële materiaalfactor die de onzekerheden in de sterkte-eigenschappen van het materiaal in rekening brengt en die afhankelijk is van de spreiding van de materiaaleigenschappen

Voor het rekenvoorbeeld zullen de lamel- en laminaateigenschappen bepaald worden aan de hand van de theoretische modellen die voorgesteld worden in Hoofdstuk 3 van de CUR-aanbevelingen. Hierdoor zal  $\gamma_{M1}$  gelijk genomen worden aan de waarden opgelijst in Tabel 2.

**Tabel 2: Partiële materiaalfactor voor de geometrische afwijkingen en modelonzekerheden**

$\gamma_{M1}$	Sterkte	Lokale stabiliteit	Globale stabiliteit
CUR96:2019	1,35	1,15	1,15
Testen	1,15	1,15	1,15

In het voorontwerp mag aangenomen worden dat met het proces vacuüminjectie een variatiecoëfficiënt op het spanningsniveau  $V_x \leq 0,10$  wordt behaald. In het geval van nageharde laminaten, waarvoor geldt dat voor ingebruikname van de draagconstructie ten minste de in het ontwerp aangehouden harseigenschappen zijn gerealiseerd met betrekking tot  $T_g$ , zal  $\gamma_{M2}$  gelijk genomen worden aan de waarden in Tabel 3.

**Tabel 3: Partiële materiaalfactor voor de onzekerheden in de sterkte-eigenschappen**

$\gamma_{M2}$	Sterkte	Lokale stabiliteit	Globale stabiliteit
Vacuüminfusie	1,2	1,4	1,35
Handlamineren	1,5	2,0	1,50

#### Variatiecoëfficiënt op het spanningsniveau

Afhankelijk van de gekozen productiemethoden zullen imperfecties tijdens de productie van de brug optreden. Deze imperfecties zullen interne spanningswijzigingen in de laminaten teweegbrengen. Hoe minder imperfecties aanwezig zullen zijn door het productieproces, des te constanter zal het spanningsniveau in het laminaat zijn tijdens het belasten. Deze variatie wordt dus meegenomen in de bepaling van de materiaalcoëfficiënt.

De partiële materiaalfactor in dit rekenvoorbeeld wordt gelijk genomen aan de waarden in Tabel 4.

**Tabel 4: Partiële materiaalfactor voor de specifieke weerstand**

$\gamma_M$	Sterkte	Lokale stabiliteit	Globale stabiliteit
UGT	1,62	1,61	1,55
GGT	1,00	1,00	1,00

## 2.2 Conversiefactor

De totale conversiefactor moet worden berekend uit:

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

Met:

- $\eta_{ct}$  Conversiefactor voor temperatuureffecten
- $\eta_{cm}$  Conversiefactor voor effecten van water(damp)
- $\eta_{cv}$  Conversiefactor voor effecten van kruip
- $\eta_{cf}$  Conversiefactor voor effecten van vermoeiing

Voor verschillende toetsingsaspecten zullen echter verschillende conversiefactoren met elkaar vermenigvuldigd dienen te worden om te komen tot  $\eta_c$ .

### 2.2.1 Temperatuureffecten

De conversiefactor voor **temperatuureffecten** ( $\eta_{ct}$ ) in een VVK laminaat bedraagt:

- 0,9 voor toetsen in de uiterste grenstoestand;
- voor toetsen in de gebruiksgrenstoestand:
  - 1,0 voor een maximale gebruikstemperatuur  $T_d \leq T_g - 40^\circ\text{C}$ ;
  - 0,9 voor een maximale gebruikstemperatuur  $T_g - 40^\circ\text{C} < T_d \leq T_g - 20^\circ\text{C}$ .

Aangezien de glastransitietemperatuur ( $T_g$ ) van een polyester tussen de 60 en 100°C bedraagt, zal in het slechtste geval de maximale gebruikstemperatuur in het laatste gebied vallen waardoor de conversiefactor voor de temperatuureffecten voor zowel de uiterste en de gebruiksgrenstoestand gelijk is aan 0,9.

### 2.2.2 Effecten van water(damp)

De conversiefactor voor **effecten door water(damp)** ( $\eta_{cm}$ ) in een VVK laminaat bedraagt:

- 1,0 voor een VVK-constructie die zich vrijwel voortdurend in droge omstandigheden bevindt;
- 0,9 voor een VVK-constructie die is blootgesteld aan wisselende omstandigheden, waarbij droge en natte periodes elkaar afwisselen;
- 0,7 voor een VVK-constructie die vrijwel voortdurend is blootgesteld aan water(damp), zoals oppervlaktewater, grondwater, zeewater.

In dit geval zal gebruik gemaakt worden van een conversiefactor van 0,9 aangezien de brug blootgesteld zal worden aan wisselende omgevingscondities.

### 2.2.3 Effecten van kruip

**Kruip** moet bij het toetsen van optredende vervormingen en de sterkte en stabiliteit onder de (quasi-) blijvende belastingscombinatie in rekening worden gebracht door middel van een conversiefactor  $\eta_{cv}$ , en wordt berekend aan de hand van de volgende formule volgens de CUR-aanbevelingen (SBRCURnet, 2018):

$$\eta_{cv} = \frac{1}{r_v \cdot t^n}$$

Met:

- $r_v$  Factor voor de theoretische rektoename in het beschouwde lamel, berekend met de volgende vergelijking:

$$r_v = \frac{E_i \cdot t_{lam}}{\sum E_{v,i} \cdot t_{v,i}}$$

$E_i$  : De stijfheid van het laminaat in de beschouwde richting

$t_{lam}$  : De dikte van het laminaat

$\sum E_{v,i} \cdot t_{v,i}$  : De axiale stijfheid van het laminaat voor de beschouwde richting

t Tijdsduur van de belasting(en) in uren

n Exponent afhankelijk van het type vezelversterking.

- n = 0,01 voor een UD-lamel (unidirectioneel)
- n = 0,04 voor een weefsellemel
- n = 0,10 voor een matlamel

Voor laminaten met UD- en/of weefsellemellen met verschillende vezeloriëntaties, eventueel gecombineerd met matlamellen, moet de conversiefactor als volgt worden bepaald (SBRCURnet, 2018):

- a. Bepaal welke UD- of weefsellemellen met hun vezels in de richting van de langdurige belasting lopen en welke niet. Voor matlamellen is dit niet relevant. Deze werken altijd mee, maar dan in beperkte mate.
- b. Bereken de toename van de rek onder langdurige belasting in de UD- of weefsellemellen (en eventueel ook matlamellen) die met hun vezels in de richting van de langdurige belasting lopen als volgt:
  - i. bereken eerst de rek onder de langdurige belasting en in de richting van de langdurige belasting van het oorspronkelijke laminaat;
  - ii. laat vervolgens de UD- en weefsellemellen die met hun vezels niet in de richting van de langdurige belasting lopen weg uit het laminaat of geef deze een stijfheid nul en bereken vervolgens weer de rek onder de langdurige belasting in de richting van de langdurige belasting;
  - iii. bereken de factor  $r_v$  waarmee de rek toeneemt door het quotiënt van beide rekken te nemen;
  - iv. vermenigvuldig de factor waarmee de rek toeneemt met de tijdsafhankelijke component van de kruipfactor  $t^n$  volgens bovenstaande formule. Hou daarbij rekening met het type vezelversterking in de richting van de langdurige belasting en de tijdsduur van de belasting. Dit levert de totale conversiefactor voor kruip.

Zijn de vezelversterkingen die de langdurige belasting moeten opnemen verschillend van aard, bijvoorbeeld een combinatie van een UD- en weefsel- of matlamel, dan moet een gewogen waarde voor de exponent n worden bepaald. De weging moet plaatsvinden op basis van de dikte van de lamel maal het vezelvolumepercentage van de betreffende lamel ten opzichte van de sommatie van alle lameldiktes maal hun vezelvolumepercentages (alleen voor de lamellen waarvan de vezels in de richting van de langdurige belasting liggen). Bi- en multidirectionele legfels moeten worden beschouwd als een stapeling van UD-lagen met verschillende vezeloriëntaties (SBRCURnet, 2018).

Voor twee veelvoorkomende laminaten geeft de CUR een indicatieve waarde voor de conversiefactor voor de effecten van kruip:

- Voor een quasi-isotroop GVK laminaat opgebouwd uit UD-lamellen van E-glas en polyesterhars met 25% van de vezels in iedere hoofdrichting, kan voor een levensduur van 100 jaar gerekend worden met een waarde van  $\eta_{cv} = 0,44$ .
- Voor een anisotroop GVK laminaat opgebouwd uit UD-lamellen van E-glas en polyesterhars met 55% van de vezels in de 0-richting en 15% van de vezels in elk van de drie andere

richtingen, kan voor een levensduur van 100 jaar gerekend worden met een conversiefactor voor kruip van  $\eta_{cv} = 0,70$ .

In sectie 3.3 kan de opbouw van de laminaten teruggevonden worden. Hieruit kan men vereenvoudigen dat 55% van de vezels in de 0-richting en 15% van de vezels in elk van de drie andere hoofdrichtingen aanwezig is, waardoor de conversiefactor voor de effecten van kruip dicht tegen de waarde van 0,70 zal aanleunen.

#### 2.2.4 Effecten van vermoeiing

Met **vermoeiing** moet rekening worden gehouden indien:

- sprake is van constructies waarbij de grootte van de belasting cyclisch varieert en het aantal te verwachten vermoeiingsbelastingswisselingen groter is dan 5000, of;
- waarbij het absolute maximum van de cyclische belasting groter is dan 40% van de breuklast.

Aangezien in dit rekenvoorbeeld een fietsers- en voetgangersbrug berekend wordt, zal hier geen vermoeiingsbelasting optreden. Er dient dus geen stijfheidsverlies voor de VVK laminaten door vermoeiing in rekening gebracht te worden. Voor de conversiefactor voor vermoeiing zal bijgevolg gelden:  $\eta_{cf} = 1,00$ .

#### 2.2.5 Conversiefactoren bij verschillende toetsingsaspecten

Hieronder kan een samenvattende tabel teruggevonden worden voor de verschillende conversiefactoren voor de verschillende toetsingsaspecten die gebruikt zullen worden bij het ontwerp in dit rekenvoorbeeld.

**Tabel 5: Conversiefactoren voor de toetsingsaspecten in UGT en GGT**

Toetsingsaspect		Conversiefactoren				
		$\eta_{ct}$	$\eta_{cm}$	$\eta_{cv}$	$\eta_{cf}$	$\eta_c$
UGT	Sterkte onder quasi-permanente belasting ( $\eta_{cl,s}$ )	0,90	0,90	0,70	-	<b>0,567</b>
	Sterkte onder kortdurende belasting ( $\eta_{ck,s}$ )	0,90	0,90	-	-	<b>0,810</b>
	Stabiliteit ( $\eta_{c,stab}$ )	0,90	0,90	0,70	1,00	<b>0,567</b>
	Vermoeiing ( $\eta_{c,f}$ )	0,90	0,90	-	-	<b>0,810</b>
GGT	Vervorming onder quasi-permanente belasting ( $\eta_{cl,d}$ )	0,90	0,90	0,70	1,00	<b>0,567</b>
	Vervorming onder kortdurende belasting ( $\eta_{ck,d}$ )	0,90	0,90	-	-	<b>0,810</b>
	Trillingen onder quasi-permanente belasting ( $\eta_{cl,t}$ )	0,90	0,90	-	1,00	<b>0,810</b>
	Trillingen onder kortdurende belasting ( $\eta_{ck,t}$ )	0,90	0,90	-	-	<b>0,810</b>
	Schade ( $\eta_{c,dam}$ )	0,90	0,90	0,70	1,00	<b>0,567</b>

## 3 MATERIALEN

### 3.1 Materiaaleigenschappen

Als materiaal wordt gebruik gemaakt van E-glas vezels, een polyestermatrix en een PUR schuimkern. Bovenop het brugdek wordt een slijtlaag uit bitumenemulsie ingestrooid met split gebruikt. De leuning bestaat uit roestvrijstalen profielen. Tabel 6 geeft de dichtheden weer voor de verschillende onderdelen van de brug die gebruikt worden voor de berekening van het gewicht van de brug.

Tabel 6: Dichtheden van de gebruikte materialen in de fietsers- en voetgangersbrug

Categorie	Materiaal	Symbool	Dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]
Vezels	E-glas	$\rho_f$	2570
Matrix	Polyester	$\rho_m$	1200
Kernmateriaal	Polyurethaan schuim (PUR)	$\rho_{kern}$	50
Slijtlaag	Bitumenemulsie ingestrooid met split	$\rho_{slijt}$	1700
Leuning	Roestvrij staal	$\rho_{ing}$	8000

In Tabel 7 en Tabel 8 worden de mechanische eigenschappen van E-glasvezels en de polyestermatrix respectievelijk weergegeven. In de context van vezelmateriaal wordt het subscript '1' gebruikt als indicatie van de vezelrichting en het subscript '2' voor de richting loodrecht hierop.

Tabel 7: Materiaaleigenschappen van de E-glasvezels

E-glasvezels			
Categorie	Eigenschap	Waarde	Eenheid
Trek in vezelrichting	Stijfheid, $E_{f1}$	73100	MPa
	Poisson-factor, $\nu_{f1}$	0,24	-
	Rekgrens, $\epsilon_{f1,t}$	3,8	%
	Sterkte, $f_{f1,t}$	2750	MPa
Trek loodrecht op vezelrichting	Stijfheid, $E_{f2}$	73100	MPa
	Poisson-factor, $\nu_{f2}$	0,24	-
	Rekgrens, $\epsilon_{f2,t}$	2,4	%
	Sterkte, $f_{f2,t}$	1750	MPa
Druk loodrecht en in vezelrichting	Rekgrens, $\epsilon_{f1,c}$	2,4	%
	Sterkte, $f_{f1,c}$	1750	MPa
Afschuiving	Afschuifstijfheid, $G_f$	30000	MPa
	Afschuifgrens, $\gamma_{f12}$	5,6	%
	Afschuifsterkte, $\tau_{f12}$	1700	MPa

In bovenstaande tabel zijn de eigenschappen van de vezels in trek opgesplitst in de eigenschappen in de vezelrichting en loodrecht hierop.

Tabel 8: Materiaaleigenschappen van het polyesterhars

Polyester		
Eigenschap	Waarde	Eenheid
Poisson-factor, $\nu_m$	0,38	-
Glastransitietemperatuur, $T_g$	60-100	°C
Trek- en druksterkte, $f_m$	55	MPa
Stijfheid op trek, $E_m$	3550	MPa
Rekgrens op trek en druk, $\epsilon_m$	1,8	%
Afschuifmodulus, $G_m$	1350	MPa
Afschuifsterkte, $\tau_m$	50	MPa
Afschuifgrens, $\gamma_m$	3,8	%

### 3.2 Lameleigenschappen

Voor de productie wordt gebruik gemaakt van het vacuüminfusieproces (VARTM) en wordt gestreefd naar een vezelvolumepercentage ( $V_f$ ) van de laminaten van 55%. Door gebruik te maken van de mengregel (Rule of Mixture) en de bovenstaande gegevens, kan de dichtheid van het composietmateriaal E-glas/polyester berekend worden.

$$\rho_c = V_f \cdot \rho_f + (1 - V_f) \cdot \rho_m = 1953,50 \text{ kg/m}^3$$

Voor de opbouw van het laminaat wordt gebruik gemaakt van UD-lamellen. De lameleigenschappen kunnen berekend worden aan de hand van de onderstaande formules van Halpin-Tsai en het vooropgestelde vezelvolumepercentage. In deze context worden de subscripten '1' en '2' opnieuw gebruikt ter indicatie van respectievelijk de vezelrichting, waarnaar ook verwezen wordt als de langsrichting van het lamel, en de richting loodrecht hierop. De stijfheid in de langs- ( $E_1$ ) en dwarsrichting ( $E_2$ ), de afschuivingsstijfheid ( $G_{12}$ ) en de poissonfactor/dwarscontractiecoëfficiënt in het vlak van de lamel ( $\nu_{12}$ ) kunnen berekend worden door gebruik te maken van de waarden vermeld in de voorgaande tabellen van de materialen.

$$E_{c1} = [E_{f1} \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)] \cdot \phi_{UD}$$

$$E_{c2} = \left[ \frac{1 + \xi_2 \eta_2 V_f}{1 - \eta_2 V_f} \cdot E_m \right] \cdot \phi_{UD} \quad \text{met } \eta_2 = \frac{\left( \frac{E_{f2}}{E_m} - 1 \right)}{\left( \frac{E_{f2}}{E_m} + \xi_2 \right)} \quad \text{met } \xi_2 = 2$$

$$G_{c12} = \left[ \frac{1 + \xi_G \eta_G V_f}{1 - \eta_G V_f} \cdot G_m \right] \cdot \phi_{UD} \quad \text{met } \eta_G = \frac{\left( \frac{G_f}{G_m} - 1 \right)}{\left( \frac{G_f}{G_m} + \xi_G \right)} \quad \text{met } \xi_G = 1$$

$$\nu_{12} = \nu_{f1} \cdot V_f + \nu_m \cdot (1 - V_f)$$

Met  $\phi_{UD}$  een empirische reductiecoëfficiënt gelijk aan 0,97.

Aan de hand van de bovenstaande formules kunnen de karakteristieke waarden voor de stijfheden voor een UD-lamel op basis van E-glas met een onverzadigde polyester berekend worden. De resultaten hiervan worden in Tabel 9 weergegeven. Deze waarden kunnen tevens uit tabel 3.4 op pagina 43 van de CUR-aanbevelingen genomen worden.

**Tabel 9: Karakteristieke stijfheidswaarden UD-lamel**

Materialen	E-glas/polyester	
Volumepercentage	$V_f$	55%
Stijfheid langsrichting	$E_{c1}$	40500 MPa
Stijfheid dwarsrichting	$E_{c2}$	12900 MPa
Glijdingsmodulus	$G_{c12}$	3956 MPa
Poisson-factor	$\nu_{c12}$	0,30

De rekgrenzen van een UD-lamel bestaande uit glasvezels en een polyestermatrix worden in Tabel 10 weergegeven en zijn terug te vinden in tabel 3.7 op pagina 45 van de CUR-aanbevelingen. Aan de hand van deze rekgrenzen en de bovenstaande karakteristieke stijfheden van de lamel kunnen de karakteristieke waarden van de sterkte-eigenschappen van het lamel berekend worden. De uitkomst van deze bewerking is terug te vinden in de laatste kolom van Tabel 10.

**Tabel 10: Karakteristieke rekgrenzen en sterktewaarden UD-lamel**

Categorie	Symbool	Rekgrens [%]	Karakteristieke sterkte waarde [MPa]
Trek	$\epsilon_{1t,Rk}$	2,0	810,0
	$\epsilon_{2t,Rk}$	0,2	25,8
Druk	$\epsilon_{1c,Rk}$	1,2	486,0
	$\epsilon_{2c,Rk}$	0,9	116,1
Afschuiving	$\gamma_{12,Rk}$	1,9	75,2

### 3.3 Laminaateigenschappen

De karakteristieke waarden van de laminaateigenschappen worden bepaald door berekening met de klassieke laminaattheorie (KLT) waarbij de bovenstaande karakteristieke lameleigenschappen moeten worden aangehouden. Voor elk laminaat wordt een lokaal assenstelsel ( $x, y, z$ ) gedefinieerd waarbij de  $x$ -as overeenstemt met de lengterichting, de  $y$ -as met de breedterichting en de  $z$ -as met de dikterichting van het laminaat.

De verschillende opbouwen van de laminaten gebruikt in de productie van het brugdek worden in Figuur 15 weergegeven aan de hand van de percentages van de totale laminaatdikte die bestaan uit lamellen met de verschillende vezelrichtingen. Aan de hand van deze percentages en de dikte van de verschillende laminaten, kunnen de theoretische diktes van de lamellen horende bij elk van de hoofdrichtingen berekend worden. Tevens wordt verder in de berekening rekening gehouden met de specifieke opbouw van de laminaten en de positionering van de lamellen ten opzicht van de neutrale as van het laminaat. De  $0^\circ$ -richting komt overeen met de lokale  $x$ -as van het laminaat.

Tabel 11: Opbouw van de laminaten in het brugdek

Onderdelen	Dikte laminaat [mm]	Percentage van laminaatdikte per vezelrichting [%]				Dikte lamel per vezelrichting [mm]			
		0°	90°	45°	-45°	0°	90°	45°	-45°
Bovenflens	14	50	10	20	20	7,00	1,40	2,80	2,80
Onderflens	14	60	10	15	15	8,40	1,40	2,10	2,10
Lijfplaten	6	0	50	25	25	0	3,00	1,50	1,50
Zijranden	25	0	50	25	25	0	12,5	6,25	6,25

De karakteristieke waarde voor de stijfheden in de langs- en dwarsrichting van de verschillende laminaten kan berekend worden uit de ABD-matrix aan de hand van de volgende formules:

$$E_x = \frac{1}{t_{lam}} \cdot \left( A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right) \quad E_y = \frac{1}{t_{lam}} \cdot \left( A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) \quad G_{xy} = \frac{A_{66}}{t_{lam}}$$

Voor glasvezelversterkte thermohardende kunststoffen met in elke hoofdrichting ten minste 12,5% van de vezelversterking mag voor de sterkte in het vlak van het laminaat in de uiterste grenstoestanden in iedere richting, zowel voor (buig)trek, druk als afschuiving, worden uitgegaan van het vereenvoudigd rekriterium. Dit is een lineaire rekgrens van 1,2% en een schuifrekgrens van 1,6% onder een éénassige spanningstoestand of zuivere afschuiving. De karakteristieke sterkte van de laminaten wordt berekend door:

$$f_{xt,Rk} = f_{xc,Rk} = 1,2\% \cdot E_x \quad f_{yt,Rk} = f_{yc,Rk} = 1,2\% \cdot E_y \quad \tau_{xy,Rk} = 1,6\% \cdot G_{xy}$$

Aan de hand van de bovenstaande formules kunnen de stijfheden en de sterktes van de laminaten die gebruikt worden in het brugdekpaneel berekend worden. De resultaten hiervan worden in Tabel 12 samengevat.

Tabel 12: Stijfheids- en sterktewaarden voor de laminaten in het brugdek

Onderdeel	Eigenschap					
	$E_x$ [GPa]	$E_y$ [GPa]	$G_{xy}$ [GPa]	$f_{xt,Rk}, f_{xc,Rk}$ [MPa]	$f_{yt,Rk}, f_{yc,Rk}$ [MPa]	$\tau_{xy,Rk}$ [MPa]
Bovenflens	27,37	17,00	7,07	328,48	203,99	113,16
Onderflens	30,06	16,79	6,29	360,75	201,51	100,69
Lijfplaten	14,45	26,95	7,85	173,38	323,35	125,62
Zijranden	14,45	26,95	7,85	173,38	323,35	125,62

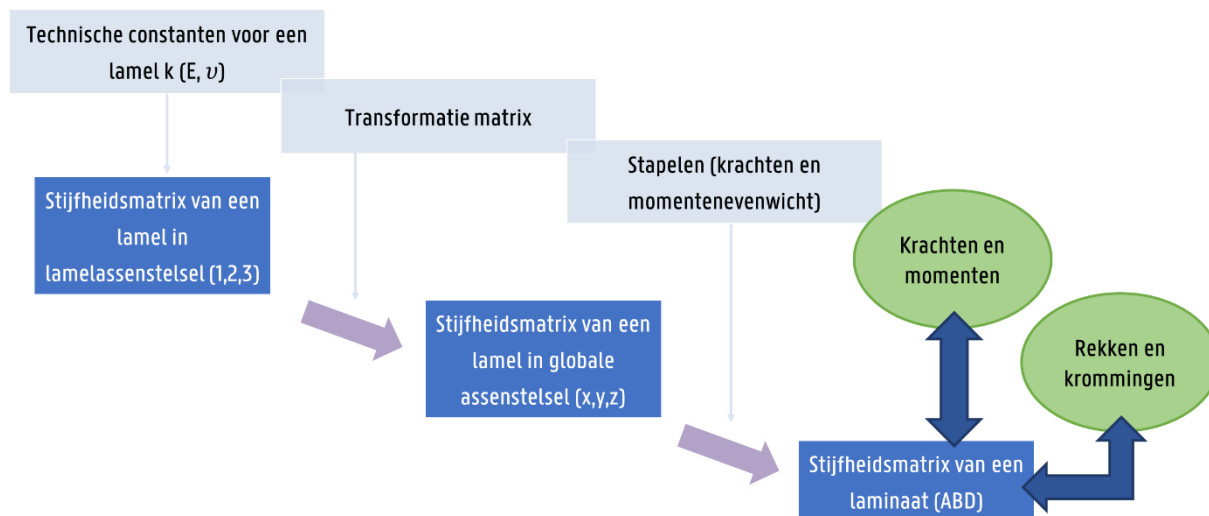
### 3.3.1 Klassieke laminaattheorie (KLT)

Voor de berekening van de respons van een laminaat op een belasting kan gebruik worden gemaakt van de klassieke laminaattheorie (KLT). VVK laminaten zijn dikwijls orthotroop van karakter en in lagen (lamellen) opgebouwd met verschillende diktes en vezeloriëntaties. Daarom zijn responsberekeningen nogal complex waardoor de klassieke laminaattheorie zich goed leent voor het uitwerken met behulp van rekensoftware. Daarmee kunnen de eigenschappen en de respons van een laminaat vrij eenvoudig worden berekend.

In het geval van specifieke randvoorwaarden kunnen bepaalde vereenvoudigingen in de stijfheidsmatrices worden toegepast. In het voorontwerp van constructies kan ervoor worden gekozen om de invloed van de lamelstapeling op de buigstijfheid van het laminaat te verwaarlozen.



In Figuur 3 kan een schematische weergave teruggevonden worden van de uitgevoerde werkwijze bij het opstellen van de stijfheidsmatrix van het laminaat (ABD-matrix) in de klassieke laminaattheorie.

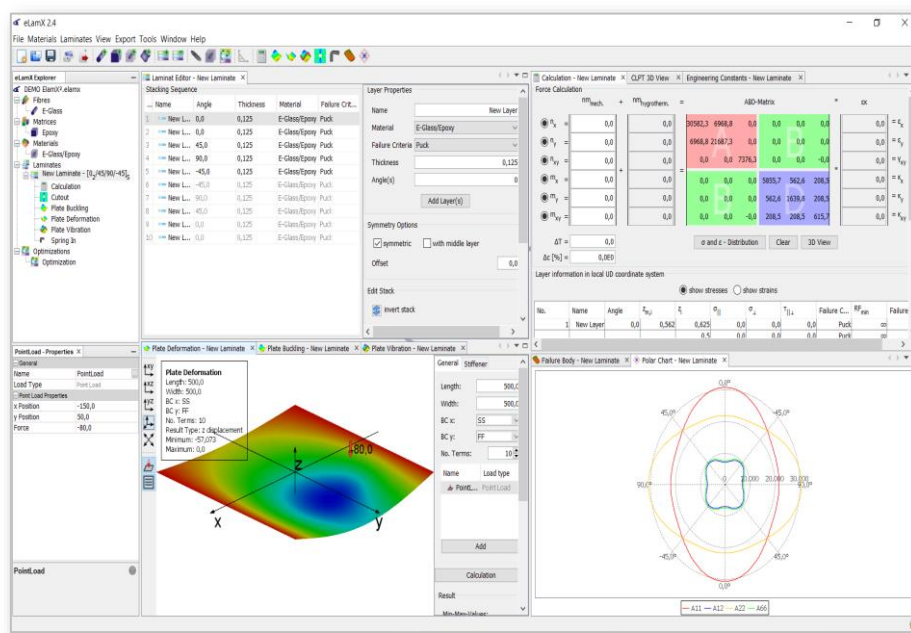


**Figuur 3: Schematische weergave van de gebruikte methode in de klassieke laminaattheorie**

### 3.3.2 eLamX<sup>2</sup>

eLamX<sup>2</sup> is een gratis softwarepakket voor de berekening van composieten platen die ontwikkeld is aan de Technische Universiteit Dresden. De berekeningen in dit programma zijn gebaseerd op de klassieke laminaattheorie. Tot op heden bevat de software modules voor de berekening van hygrothermische effecten, breukanalyse en technische constanten, stabiliteits- en vervormingsanalyse van composieten platen en een vergelijking van verscheidene breukcriteria.

Het programma stelt gebruikers in staat om op een eenvoudige manier een laminaat met verschillende lagen op te bouwen en dit aan de hand van zelfbepaalde eigenschappen voor de vezel, het hars of het composiet of door gebruik te maken van de eigenschappen uit de built-in materiaalbibliotheek voor composieten met verschillende vezel-hars combinaties die teruggevonden kunnen worden in de literatuur. De ADB-matrix en de technische constanten van het laminaat zullen vervolgens berekend worden. Aan de hand van deze ABD-matrix kan een relatie gelegd worden tussen de krachten en momenten in het vlak van het laminaat en de vervormingen en krommingen van het laminaat. De berekening kan in de software in beide richtingen gebeuren, dit wil zeggen dat zowel een kracht als een vervorming kan aangelegd worden en dat respectievelijk de vervormingen of de krachten berekend kunnen worden. De software kan verder de trek, druk- en afschuifspanningen in de individuele lagen bepalen en deze weergeven in een bevattelijke grafiek. Om de gebruiker meer inzicht te geven in de gedragingen van de composieten plaat, is het ook mogelijk om de (aangelegde) vervorming van en krachten op de composieten plaat weer te geven in 3D.



Figuur 4: Screenshot van de eLamX<sup>2</sup> software

De software maakt het ook mogelijk de vervormingen ten gevolge van krachten en momenten uit het vlak van het laminaat te berekenen en een stabiliteitsanalyse (knik) uit te voeren. In beide gevallen zal een 3D-weergave toegepast worden om de resultaten en eventueel de plaatsen waar het laminaat zal falen weer te geven.

Verder bevat de software een built-in optimalisatietool die de geschikte opbouw van het laminaat berekent voor verschillende opgelegde randvoorwaarden, kunnen de verschillende faalcriteria visueel worden weergegeven en kan een grafische weergave gegeven worden van de first-ply en last-ply breuk van het beschouwde laminaat voor verschillende belastingsituaties.

Resultaten voor de technische constanten van het laminaat kunnen gebruikt worden in het opstellen van een analytische handberekening en in bouwkundige rekenmodellen met bijvoorbeeld SCIA Engineer of in vereenvoudigde eindige-elementenmodellen. In zulke modellen is het belangrijk dat steeds geopteerd wordt voor orthotrope materialen met een verschillende stijfheid in de hoofrichtingen van het materiaal.

### 3.3.3 Sterkte laminaat op basis van sterkte lamel

#### 3.3.3.1 Sterkte van eenvoudig bidirectioneel laminaat

Op basis van de sterkteberekening op lamelniveau kan de sterkte van het laminaat worden voorspeld. Dit wordt doorgaans gedaan aan de hand van de discountmethode. Deze methode wordt verduidelijkt in 'Introduction to Composite Materials Design' van Ever J. Barbero. In essentie komt het neer op een incrementele sterkteberekening op basis van de sterktes van de lamellen. Bij falen van een lamel door druk of trek in de harsrichting (2) of in afschuiving worden de eigenschappen van de gefaalde lamel vervangen door een verdisconteerde waarde. Het falen van de eerste laag wordt first ply failure genoemd. Het uiteindelijke falen van het laminaat door vezelbreuk (1)s wordt last ply failure genoemd.

Bij de bepaling van het falen van de verschillende lamina in het laminaat zal gebruik gemaakt worden van stijfheid- en sterkte waarden zoals deze in Tabel 9 en Tabel 10 berekend worden. Voor de verdisconteerde waarde van een gefaalde laag wordt een reductiewaarde  $d=0,99$  gehanteerd, wat wil zeggen dat slechts 1% van de stijfheid in de gefaalde richting zal overblijven.

In een eerste geval zal ter illustratie van de discountmethode het falen van een bidirectioneel laminaat met een  $[0/90]_s$  opbouw bekeken worden onder een axiale trekbelasting. Elke laag in het laminaat is 0,25 mm dik, wat een totale dikte van het laminaat geeft van 1,0 mm. Aan de hand van de ABD-matrix ontwikkeld in de klassieke laminaattheorie (KLT) kan in eLamX<sup>2</sup> het falen van een laag bepaald worden aan de hand van het maximum stress faalcriterium.

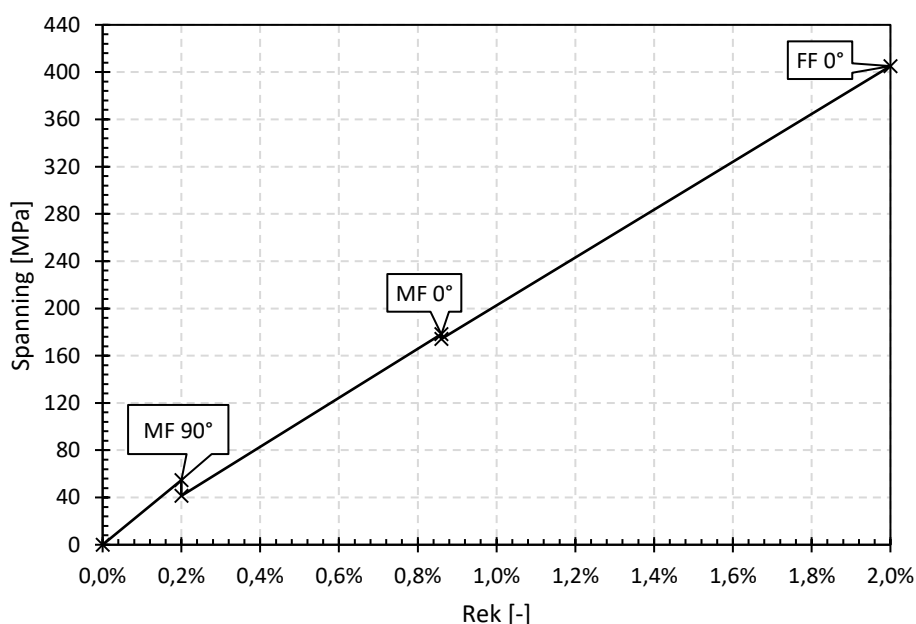


**Figuur 5: Laagopbouw bidirectioneel laminaat**

De resultaten van deze uitwerking aan de hand van eLamX<sup>2</sup> kunnen in Tabel 13 en Figuur 6 teruggevonden worden. In de bepaling van de spanning is het belangrijk dat de resulterende totale spanning aanwezig op het laminaat gedeeld wordt door de totale dikte van het laminaat, in dit geval 1 mm. In de figuur worden tevens de verschillende faalmodi aangegeven aan de hand van afkortingen.

**Tabel 13: Rekken, spanningen en faalmodi in een bidirectioneel laminaat**

Rek	Laminaatkracht [N/mm]	Spanning [MPa]	Faalmodi
0,00%	0	0	
0,20%	54,7	54,7	Matrix failure (MF) in 90° lagen 2 en 3
0,20%	41,4	41,4	Spanningsdaling
0,86%	178,1	178,1	Matrix failure (MF) in 0° lagen 1 en 4
0,86%	174,2	174,2	Spanningsdaling
2,00%	405,1	405,1	Fibre failure (FF) in 0° lagen 1 en 4



**Figuur 6: Spannings-rekgrafiek in een bidirectioneel laminaat**

Tabel 14 geeft de first en last ply failure (FPF en LPF) sterktewaardes voor verschillende belastingsgevallen waarbij gebruik wordt gemaakt van het Maximum Stress faalcriterium. Voor de belasting in het vlak van de plaat wordt een onderscheid gemaakt tussen trek in de x- en y-richting,  $N_{x+}$  en  $N_{y+}$ , en druk in de x- en y-richting,  $N_{x-}$  en  $N_{y-}$ .

**Tabel 14: First en last ply failure waardes voor verschillende belastingsgevallen voor het bidirectioneel laminaat**

Belasting	FPF	LPF
-----------	-----	-----

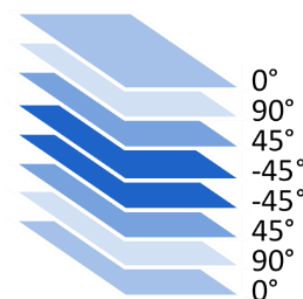
	Laminaatkracht [N/mm]	Spanning [MPa]	Laminaatkracht [N/mm]	Spanning [MPa]
$N_{x+}$	54,7	54,7	406,3	406,3
$N_{x-}$	-245,7	-245,7	-243,7	-243,7
$N_{y+}$	54,7	54,7	406,3	406,3
$N_{y-}$	-254,7	-254,7	-243,7	-243,7
$N_{xy}$	75,2	75,2	75,2	75,2

Belasting	FPF		LPF	
	Laminaatmoment [Nmm/mm]	Spanning [MPa]	Laminaatmoment [Nmm/mm]	Spanning [MPa]
$M_x$	25,9	155,4	70,9	425,4
$M_y$	5,5	33	20,7	124,2

### 3.3.3.2 Sterkte van onderflens

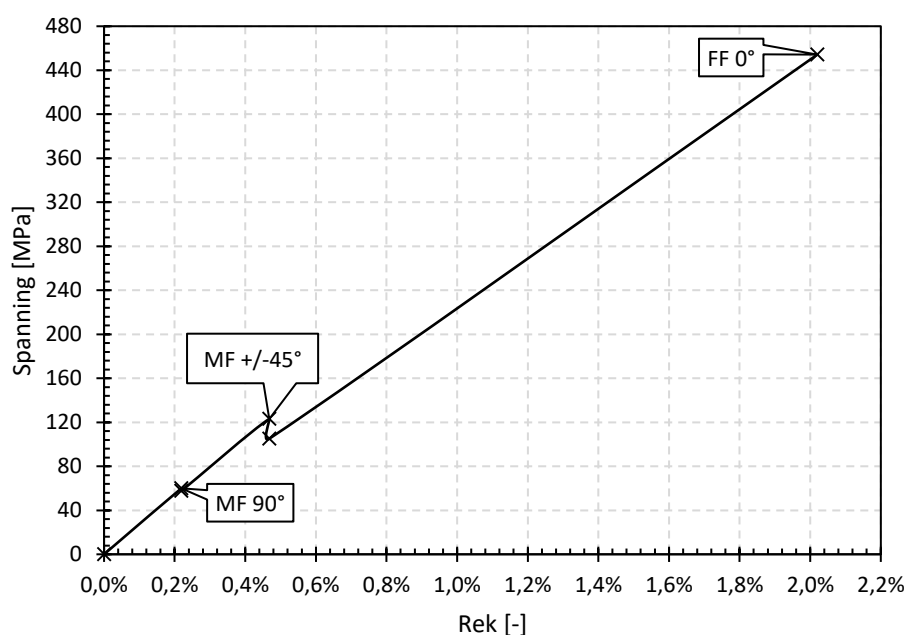
In een tweede voorbeeld wordt de sterkte van het laminaat van de onderflens van het rekenvoorbeeld uitgewerkt. Het laminaat heeft een  $[0/90/\pm 45]_s$  opbouw met variërende laagdiktes zoals in Tabel 11 weergegeven en een totale dikte van 14,0 mm.

De resultaten van de met eLamX<sup>2</sup> berekende spanningen, worden in de tabel en Figuur 7 weergegeven, waarbij tevens rekening wordt gehouden met de dikte van het laminaat voor het bepalen van de sterktes. Als laatste worden in Tabel 16 tevens de sterktewaarden bij FPF en LPF bepaald bij verschillende belastingsgevallen.



Tabel 15: Rekken, spanningen en faalmodi in het laminaat van de onderflens

Rek	Laminaatkracht [N/mm]	Spanning [MPa]	Faalmodi
0,00%	0	0	
0,22%	839,7	60,0	Matrix failure (MF) in 90°-lagen 2 en 7
0,22%	806,5	57,6	Spanningsdaling
0,47%	1722,7	123,1	Matrix failure (MF) in +/-45°-lagen (3 t.e.m. 6)
0,47%	1471,2	105,1	Spanningsdaling
2,02%	6359,0	454,2	Fibre failure (FF) in 0°-lagen 1 en 8



Figuur 7: Spannings-rekgrafiek in laminaat van de onderflens

Tabel 16: First en last ply failure waarden voor verschillende belastingsgevallen voor het laminaat van de onderflens

Belasting	FPF		LPF	
	Laminaatkracht [N/mm]	Spanning [MPa]	Laminaatkracht [N/mm]	Spanning [MPa]
$N_{x+}$	839,7	60,0	6255,9	446,9
$N_{x-}$	-3775,3	-269,7	-3753,5	-268,1
$N_{y+}$	497,9	35,6	2105,7	150,4
$N_{y-}$	-2238,5	-159,9	-1263,4	-90,2
$N_{xy}$	549,7	39,3	1373,1	98,1

Belasting	FPF		LPF	
	Laminaatmoment [Nmm/mm]	Spanning [MPa]	Laminaatmoment [Nmm/mm]	Spanning [MPa]
$M_x$	5175,7	158,4	14003,8	468,7
$M_y$	978,4	29,9	2267,1	69,4

Een vergelijking van Tabel 12 en Tabel 16 geeft aan dat de berekende sterkte waarden op basis van het vereenvoudigde rek criterium zoals gedefinieerd in CUR96:2019 en de discountmethode niet geheel overeenstemmen. In het bijzonder is er bij de discountmethode een duidelijk onderscheid tussen de sterktes in druk en trek terwijl dit bij het gebruik van het vereenvoudigd rek criterium niet het geval is. De CUR-richtlijn laat het vereenvoudigde rek criterium evenwel toe. In wat volgt zal met het vereenvoudigde criterium verder gerekend worden.

### 3.4 Doorsnede-eigenschappen

Met behulp van de doorsnede van het brugdek, beschreven in sectie 1, en de in Tabel 12 vermelde stijfheden kunnen de langse buigstijfheid  $EI_x$  en de afschuifstijfheid  $GA_{xy}$  bepaald worden. Deze bedragen respectievelijk  $328,87 \text{ MNm}^2$  en  $775,01 \text{ MN}$ .

### 3.5 Testen

Het proefstuk, de testopstelling en de omstandigheden voorafgaand aan en tijdens het testen moeten representatief zijn voor de te verifiëren omstandigheden en/of te bepalen eigenschappen. Testen moeten ten minste worden uitgevoerd voor ontwerpbepalende materiaal- of constructie-eigenschappen waarvoor geen betrouwbare en/of nauwkeurige theoretische modellen beschikbaar zijn.

Materiaaltesten moeten ten minste worden uitgevoerd:

- Ter verificatie, als onderdeel van het ontwerpproces en de kwaliteitsborging van het productieproces.
- Voor het bepalen van mechanische eigenschappen in VVK met minder dan 12,5% vezelversterking in de materiaalhoofdrichtingen, of VVK met een  $V_f < 15\%$ . Deze testen moeten ten minste de mechanische eigenschappen in en uit het vlak van het laminaat omvatten.
- Indien het ontwerp kritiek is op kruip en/of kruipbreuk.

Constructietesten moeten worden uitgevoerd op verbindingen die belangrijk zijn voor de constructieve veiligheid, zoals bijvoorbeeld lijm- en boutverbindingen. Bij het testen van boutverbindingen moet het gunstige effect van voorspanning worden geëlimineerd, tenzij is aangetoond dat dit effect over de levensduur behouden blijft. Elimineren van voorspanning moet plaatsvinden door bouten ten hoogste 'handvast' aan te draaien, dat wil zeggen met een voorspanning van ten hoogste  $1 \text{ N/mm}^2$ .

#### 3.5.1 Verificatietesten

De volgende testen moeten als onderdeel van de kwaliteitsborging van het productieproces ten minste voor ieder project worden uitgevoerd op ten minste zes proefstukken per laminaattype per test:

- Trektest volgens ISO 527 of ASTM D3039, ter bepaling van de treksterkte, breukrek en de elasticiteitsmodulus;
- ILSS-test volgens ISO 14130 of ASTM D2344, ter bepaling van de interlaminar shear strength (ILSS);
- $T_g$ -test volgens ISO 6721-11 of ASTM D7028, ter bepaling van de momentane  $T_g$ , af te leiden uit de storage modulus in een DMTA test.

De uit de test afgeleide karakteristieke waarde moet ten minste gelijk zijn aan de in het ontwerp aangehouden karakteristieke waarde. Indien hieraan niet wordt voldaan, moet het ontwerp hierop worden aangepast.

#### 3.5.2 Materiaaltesten

Materiaaltesten moeten worden uitgevoerd volgens NEN-EN-ISO normen of ASTM-standaarden.

Tabel 17: Normen voor materiaalproeven volgens de CUR-aanbevelingen (SBRCURnet, 2018)

Materiaal	Type test	Bruikbare norm
<b>Laminaat</b>	Trek	EN-ISO 527
	Druk	EN-ISO 14126, ASTM D6640, ASTM D3410
	Afschuiving in het vlak van het laminaat	EN-ISO 14129, ASTM D5379, ASTM D7078
	Interlaminaire afschuiving	EN-ISO 14130
	Buigeigenschappen	EN-ISO 14125
	Mode I/Mode II scheurgroei	ISO-15024, ASTM D5528
	T <sub>g</sub> en demping	EN-ISO 6721
	Vezelvolumegehalte	EN-ISO 1172, ISO 14127, ASTM D2584
	Veroudering	ISO 4892, ASTM D4329, ASTM D4587
	Waterabsorptie	ASTM D5229
<b>Sandwich/ Kernmaterialen</b>	Vermoeiing	ISO 13003, ASTM E739, ASTM D3479
	Trek/druk	ISO 1926, ASTM C297, ASTM C364
	Afschuiving	ISO 1922, ASTM C273
	Waterabsorptie	ISO 2896
<b>Lijmverbinding</b>	Vermoeiing	ASTM C394
	Sterkte	ISO 4587, ASTM D3163, ASTM D3528
<b>Hars of lijm</b>	Geleertijd	EN-ISO 2535
	Dichtheid	ISO 1675
	Krimp	EN-ISO 3521

In het ontwerpproces mag gebruik gemaakt worden van testgegevens met een afwijkend vezelvolumegehalte, mits dit niet meer dan 10% (absolute waarde) afwijkt van de ontwerpwaarde. De ontwerpgegevens moeten in dat geval voor de effecten van een afwijkend vezelvolumegehalte worden gecorrigeerd.

### 3.5.3 Constructietesten

Het (faal)gedrag van specifieke constructiedetails mag worden bepaald uit testen op full-scale proefstukken, geschaalde proefstukken en (sub)componenten. Bij de interpretatie van testresultaten moeten de effecten van schaling of afwijkingen ten opzichte van de werkelijke gebruikssituatie worden verdisconteerd, net zoals de effecten van de omgevingscondities (SBRCURnet, 2018).

## 4 BELASTINGEN

Voor het ontwerp en de berekening van VVK constructies moet worden uitgegaan van belastingen volgens EN 1991. Belastingscombinaties en partiële belastingsfactoren moeten voldoen aan EN 1990.

### 4.1 Permanente belasting

De permanente belasting op de brug bestaat uit het eigengewicht van het brugdek, de bitumineuze slijtlaag en de roestvrij stalen leuning, welke berekend kunnen worden aan de hand van de hierboven vastgelegde dichtheden en hierna vermelde afmetingen.

Tabel 18 geeft een overzicht van de massa van het brugdek inclusief de slijtlaag en de leuning.

Tabel 18: Permanente massa aanwezig op het composieten brugdek

Beschrijving	Massa [kg]
Massa brugdek, $M_{brug, str}$	8713
Massa slijtlaag, $M_{slijt}$	1795
Massa leuning, $M_{ing}$	353
<b>Totaal permanente massa, <math>M_{brug, tot}</math></b>	<b>10862</b>

Voor de berekeningen in de UGT en GGT zal gebruik gemaakt worden van de totale permanente massa met inbegrip van de massa van de slijtlaag en de leuning. Verdeeld over het oppervlak van het brugdek bedraagt deze:

$$q_{EG} = \frac{M_{brug, tot} \cdot g}{A_{brug}} = 1,51 \text{ kN/m}^2$$

## 4.2 Tijdelijke belasting

De tijdelijke belastingen die in rekening worden gebracht worden weergegeven in Tabel 19. Niet-vermelde belastingen zijn niet van toepassing of worden niet maatgevend geacht en derhalve niet meegenomen in het ontwerp en de berekeningen.

Tabel 19: Tijdelijke belastingen

<b>Gelijkmatig verdeelde belasting [EN1991]</b>			
Verdeelde belasting op nuttige oppervlak	$q_{fk}$	4,6	kN/m <sup>2</sup>
<b>Geconcentreerde belasting [EN1991]</b>			
Geconcentreerde belasting	$Q_{fvd}$	10,0	kN
Belast oppervlak, vierkant met zijde	$B_{fvd}$	0,10	m
<b>Dienstvoertuig [EN1991]</b>			
2 aslasten van elk	$Q_{svA}$	25,0	kN
Wielbasis	$L_{svA}$	3,00	m
Spoorbreedte	$B_{svA}$	1,30	m
Wielprent, vierkant met zijde	$B_{svA, w}$	0,20	m
<b>Horizontale belasting [EN1991]</b>			
Horend bij gelijkmatig verdeelde belasting	$Q_{fik0}$	29,5	kN
Horend bij dienstvoertuig	$Q_{fik1}$	30,0	kN
<b>Voetgangersstroom [EUR23984]</b>			
Gewicht één persoon	P	800,0	N
Dichtheid voetgangersstroom	$d_{TC}$	0,50	P/m <sup>2</sup>

## 4.3 Buitengewone belasting

De buitengewone belastingen die in rekening worden gebracht zijn opgelijst in Tabel 20. Niet-vermelde belastingen zijn niet van toepassing of worden niet maatgevend geacht en derhalve niet meegenomen in het ontwerp en de berekeningen.



Tabel 20: Buitengewone belasting

Onbedoeld voertuig		
Aslast vooraan	$Q_{svB1}$	80,0 kN
Aslast achteraan	$Q_{svB2}$	40,0 kN
Wielbasis	$L_{svB}$	3,00 m
Spoorbreedte	$B_{svB}$	1,30 m
Wielprent, vierkant met zijde	$B_{svB,w}$	0,20 m
Horizontale belasting t.g.v. onbedoeld voertuig	$Q_{flk2}$	72,0 kN

#### 4.4 Belastingscombinaties

In onderstaande lijst zijn de maatgevende belastingscombinaties voor fietsers- en voetgangersbruggen vermeld, gebaseerd op EN1990. De brug is ontworpen op haar bruikbaarheid onder belastingscombinaties 1, 3 en 4. De maatgevende belastingscombinaties voor de veiligheid/sterkte zijn 3, 4, 5 en 6. Er wordt verondersteld dat de andere combinaties vermeld in de Eurocodes niet van toepassing zijn of resulteren in lagere spanningen in de constructie.

Belastingscombinatie 1	Permanente belasting
Belastingscombinatie 3	Permanente belastingen + gelijkmatig verdeelde belasting + bijbehorende horizontale belasting
Belastingscombinatie 4	Permanente belastingen + gelijkmatig verdeelde belasting ( $\psi_{4q} = 0,8$ ) + dienstvoertuig + bijbehorende horizontale belasting
Belastingscombinatie 5	Permanente belastingen + geconcentreerde belasting
Belastingscombinatie 6	Permanente belastingen + onbedoeld voertuig + bijbehorende horizontale belasting

## 5 UITERSTE GRENSTOESTAND (UGT)

Voor de toetsing van de uiterste grenstoestand gelden door het optreden van kruip andere conversiefactoren voor langdurig aanwezige belastingen dan voor kortdurend aanwezige belastingen. Voor een gecombineerde toets van langdurig aanwezige belastingen en kortdurend aanwezige variabele belastingen geldt:

$$\sum_{i \geq 1} \left( \frac{E_{d,i}}{R_{d,i}} \right)_{qp} + \sum_{j \geq 1} \left( \frac{E_{d,j}}{R_{d,j}} \right)_{st} \leq 1$$

Met:

$\sum_{i \geq 1} \left( \frac{E_{d,i}}{R_{d,i}} \right)_{qp}$  de fractie van de capaciteit van het laminaat of de doorsnede die gebruikt wordt door langdurig aanwezige belastingen.

$\sum_{j \geq 1} \left( \frac{E_{d,j}}{R_{d,j}} \right)_{st}$  de fractie van de capaciteit van het laminaat of de doorsnede die gebruikt wordt door het resterende, kortdurend aanwezige deel van de belastingen.

### 5.1 Sterkte

1. Toets op **lamelniveau**: In elk lamel moet de combinatie van spanningen in de verschillende richtingen getoetst worden volgens het Tsai-Hill criterium.

$$\left(\frac{\sigma_{1,Ed}}{f_{1,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{2,Ed}}{f_{2,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12,Ed}}{\tau_{12,Rd}}\right)^2 - \frac{\sigma_{1,Ed} \cdot \sigma_{2,Ed}}{f_{1,Rd}^2} \leq 1$$

2. Toets op **laminaatniveau**: Hierbij wordt bepaald wanneer het laminaat bezwijkt op basis van een spannings- of rek criterium, volgens

$$\varepsilon_{x,Ed} \leq \frac{\eta_c \cdot 1,2\%}{\gamma_M} \quad \varepsilon_{y,Ed} \leq \frac{\eta_c \cdot 1,2\%}{\gamma_M} \quad \gamma_{xy,Ed} \leq \frac{\eta_c \cdot 1,6\%}{\gamma_M}$$

3. Toets op **doorsnedeniveau**: Indien verschillende snedekrachten tegelijkertijd aanwezig zijn, mag het gecombineerde effect niet groter zijn dan de weerstand voor die combinatie. De verhouding tussen de rekenwaarde van de belasting en hun weerstand mag lineair worden beschouwd.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Y,Ed}}{M_{Y,Rd}} + \frac{M_{Z,Ed}}{M_{Z,Rd}} + \frac{V_{Y,Ed}}{V_{Y,Rd}} + \frac{V_{Z,Ed}}{V_{Z,Rd}} + \frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0$$

### 5.1.1 Toetsing laminaatniveau

In het rekenvoorbeeld worden de laminaten van de flenzen en lijfplaten op laminaatniveau getoetst op sterkte voor de maatgevende belastingscombinaties door gebruik te maken van het vereenvoudigd rek criterium zoals dit gedefinieerd is in de CUR-aanbevelingen.

#### 5.1.1.1 Sterkte van de flenzen

Onder invloed van belastingen zal de brug in de langsrichting doorbuigen waardoor trek- en drukspanningen ontstaan in respectievelijk de onder- en bovenflens. Door de geringe dikte van de flenzen in verhouding tot de dikte van het brugdek zullen dwarskrachtspanningen slechts een klein aandeel uitmaken in het totale spanningsbeeld in de flenzen. Hierdoor kunnen de spanningen in de flenzen als uniforme langsspanningen worden beschouwd.

De **langsspanningen** in de flenzen worden getoetst in belastingscombinaties 3, 4 en 6. Indien er lokale onderbrekingen in de vezels van de flenzen aanwezig zijn, dient de belasting verhoogd te worden met een correctiefactor  $f_{red,f} = 1,25$ . In dit rekenvoorbeeld worden de vezels van de flenzen continu verondersteld waardoor deze correctiefactor gelijkgesteld wordt aan 1.

**Momenten**

Door eigengewicht

$$M_{EG} = \frac{1}{8} \cdot q_{EG} \cdot B_{brug} \cdot L_{span}^2$$

M<sub>EG</sub> 207,81 kNm

Door verdeelde belasting

$$M_q = \frac{1}{8} \cdot q_{fk} \cdot B_{nut} \cdot L_{span}^2$$

M<sub>q</sub> 575,26 kNm

Door dienstvoertuig

$$M_{serv} = \frac{L_{span} \cdot Q_{svA} \cdot \left(2 - \frac{L_{svA}}{L_{span}}\right)^2}{8}$$

M<sub>serv</sub> 161,78 kNm

Door onbedoeld voertuig

$$M_{sv} = \frac{L_{span} \left( Q_{svB1} + Q_{svB2} \cdot \left(1 - \frac{L_{svB}}{L_{span}}\right) \right)^2}{4(Q_{svB1} + Q_{svB2})}$$

M<sub>sv</sub> 415,90 kNm**Belastingscombinaties**

BC3

$$M_{BC3} = f_{red,f} \cdot \gamma_{M,UGT} \cdot \left( \frac{\gamma_{G,UGT}}{\eta_{cl,s}} \cdot M_{EG} + \frac{\gamma_{Q,UGT}}{\eta_{ck,s}} \cdot M_q \right)$$

M<sub>BC3</sub> 1744,26 kNm

BC4

$$M_{BC4} = f_{red,f} \cdot \gamma_{M,UGT} \cdot \left( \frac{\gamma_{G,UGT}}{\eta_{cl,s}} \cdot M_{EG} + \frac{\gamma_{Q,UGT}}{\eta_{ck,s}} \cdot M_{serv} \right)$$

M<sub>BC4</sub> 917,31 kNm

BC6

$$M_{BC6} = f_{red,f} \cdot \gamma_{M,UGT} \cdot \left( \frac{\gamma_{G,UGT}}{\eta_{cl,s}} \cdot M_{EG} + \frac{\gamma_{A,UGT}}{\eta_{ck,s}} \cdot M_{sv} \right)$$

M<sub>BC6</sub> 1425,54 kNm

Maatgevende combinatie

$$M_{max} = \max\{M_{BC3}; M_{BC4}; M_{BC6}\}$$

M<sub>max</sub> 1744,26 kNm**Geometrische eigenschappen**

Afstand bovenkant bovenflens tot neutrale lijn

Z<sub>bf</sub> 300,00 mm

Afstand onderkant onderflens tot neutrale lijn

Z<sub>of</sub> 300,00 mm

Traagheidsmoment flenzen

I<sub>x,f</sub> 100,93 dm<sup>4</sup>**Spanningen**

In bovenflens

$$\sigma_{x,bf,M} = \frac{M_{max} \cdot Z_{bf}}{I_{x,f}}$$

σ<sub>x,bf,M</sub> 51,85 MPa

In onderflens

$$\sigma_{x,of,M} = \frac{M_{max} \cdot Z_{of}}{I_{x,f}}$$

σ<sub>x,of,M</sub> 51,85 MPa

**Unity check**

Bovenflens

$$uc_{\sigma,x,bf} = \frac{\sigma_{x,bf,M}}{f_{xc,Rk,bf}} \quad uc_{\sigma,x,bf} \quad 0,16 \quad OK$$

Onderflens

$$uc_{\sigma,x,of} = \frac{\sigma_{x,of,M}}{f_{xt,Rk,of}} \quad uc_{\sigma,x,of} \quad 0,14 \quad OK$$

De sterkte van de flenzen vormt typisch geen probleem bij het ontwerp van de fietsers- en voetgangersbrug. Indien dit vergeleken wordt met de bovenstaande grafieken in verband met de toetsing op lamelniveau van de onder- en bovenflens, dan kan geconcludeerd worden dat bij een spanning van 51,85 MPa geen enkele laag van het laminaat bezwaken is in trek, noch in druk.

*5.1.1.2 Sterkte van de lijfplaten*

De sterkte van de lijfplaten op **afschuiving** wordt gecheckt voor belastingscombinaties 3, 4 en 6. Elke lijfplaat wordt beschouwd als het dunwandige lijf van een fictieve I-ligger met dikke flenzen. De schuifspanning in de lijfplaat wordt als constant beschouwd over de hoogte van de lijfplaat. Hierbij is de hoogte van de lijfplaat gelijk aan de afstand tussen de twee zwaartepunten van de beide flenzen. Indien er lokale onderbrekingen in de vezels van de lijfplaten aanwezig zijn, dient de belasting verhoogd te worden met een correctiefactor  $f_{red,lf} = 2$ . In dit rekenvoorbeeld worden de vezels van de flenzen en lijfplaten continu verondersteld, waardoor deze correctiefactor gelijkgesteld wordt aan 1.

In de brug zitten de lijfplaten op  $h_{of} = 200$  mm van elkaar. In belastingscombinatie 3 worden alle lijfplaten dragend verondersteld. Het totale aantal lijfplaten  $n_{lf,tot}$  volgt uit de breedte van de onderflens en de hart-op-hartafstand en is gelijk aan 20. Bij belastingscombinatie 4 worden enkel de lijfplaten direct onder de wielen beschouwd, per wiel  $n_{lf,sv} = 2$ . In de buitengewone situatie van belastingscombinatie 6 worden tevens de lijfplaten direct onder de wielen dragend verondersteld, per wiel  $n_{lf,sv} = 2$ . De randen worden in deze berekening niet meegenomen, waardoor de berekening als conservatief beschouwd mag worden.

**Dwarskrachten**

Door eigengewicht

$$V_{EG} = \frac{1}{2} \cdot q_{EG} \cdot h_{of} \cdot L_{span} \quad V_{EG} \quad 2,39 \quad kN$$

Door verdeelde belasting

$$V_q = \frac{1}{2} \cdot q_{fk} \cdot h_{of} \cdot L_{span} + \frac{Q_{f1k0} \cdot H_{brug}}{n_{lf,tot} \cdot L_{span}} \quad V_q \quad 7,34 \quad kN$$

Door dienstvoertuig

$$V_{serv} = \frac{1}{2n_{lf,serv}} \cdot \left[ Q_{svA} \cdot \left( 2 - \frac{L_{svA}}{L_{span}} \right) + \frac{Q_{f1k1} \cdot H_{brug}}{L_{span}} \right] \quad V_{serv} \quad 11,60 \quad kN$$

Door onbedoeld voertuig

$$V_{serv} = \frac{1}{2n_{lf,sv}} \cdot \left[ Q_{svB1} + Q_{svB2} \cdot \left( 1 - \frac{L_{svB}}{L_{span}} \right) + \frac{Q_{f1k2} \cdot H_{brug}}{L_{span}} \right] \quad V_{sv} \quad 28,78 \quad kN$$

**Belastingscombinaties**

BC3

$$V_{BC3} = f_{red,lf} \cdot \gamma_{M,UGT} \cdot \left( \frac{\gamma_{G,UGT}}{\eta_{cl,s}} \cdot V_{EG} + \frac{\gamma_{Q,UGT}}{\eta_{ck,s}} \cdot V_q \right) \quad V_{BC3} \quad 21,51 \quad \text{kN}$$

BC4

$$V_{BC4} = f_{red,lf} \cdot \gamma_{M,UGT} \cdot \left( \frac{\gamma_{G,UGT}}{\eta_{cl,s}} \cdot V_{EG} + \frac{\gamma_{Q,UGT}}{\eta_{ck,s}} \cdot V_{serv} \right) \quad V_{BC4} \quad 30,03 \quad \text{kN}$$

BC6

$$V_{BC6} = f_{red,lf} \cdot \gamma_{M,UGT} \cdot \left( \frac{\gamma_{G,UGT}}{\eta_{cl,s}} \cdot V_{EG} + \frac{\gamma_{A,UGT}}{\eta_{ck,s}} \cdot V_{sv} \right) \quad V_{BC6} \quad 64,40 \quad \text{kN}$$

Maatgevende combinatie

$$V_{max} = \max\{V_{BC3}; V_{BC4}; V_{BC6}\} \quad V_{max} \quad 64,40 \quad \text{kN}$$

**Geometrische eigenschappen**

Oppervlakte dwarsdoorsnede van een lijfplaat

$$A_{x,lf} = (H_{brug} - t_{bh} - t_{oh}) \cdot t_{lf} \quad A_{x,lf} \quad 3432,00 \quad \text{mm}^2$$

**Schuifspanning**

In lijfplaat

$$\tau_{xy,lf,V} = \frac{V_{max}}{A_{x,lf}} \quad \tau_{xy,lf,V} \quad 18,77 \quad \text{MPa}$$

**Unity check**

Lijfplaten

$$uc_{\tau,xy,lf} = \frac{\tau_{xy,lf,V}}{\tau_{xy,Rk,lf}} \quad uc_{\tau,xy,lf} \quad 0,15 \quad \text{OK}$$

De sterkte van de lijfplaten belast op afschuiving vormt geen probleem bij het ontwerp van de fietsers- en voetgangersbrug.

De sterkte van de lijfplaat op **druk** belast door rechtstreekse krachtsintroductie wordt getoetst aan belastingscombinatie 5. Er wordt een strook gelijk aan de tussenafstand van de lijfplaten beschouwd waarin één lijfplaat aanwezig is en de geconcentreerde belasting recht boven de lijfplaat staat.

**Belastingscombinaties**

BC5

$$P_{BC5} = \frac{\gamma_{M,UGT}}{\eta_{ck,s}} \cdot \left( \gamma_{G,UGT} \cdot q_{EG} \cdot h_{oh,lf} + \gamma_{Q,UGT} \cdot \frac{Q_{fvd}}{B_{fvd}} \right) \quad P_{BC5} \quad 200,61 \quad \text{kN/m}$$

**Drukspanningen**

In lijfplaat

$$\sigma_{y,lf,BC5} = \frac{P_{BC5}}{t_{lf}} \quad \sigma_{y,lf,BC5} \quad 33,43 \quad \text{MPa}$$

**Unity check**

Lijfplaat

$$uc_{\sigma,y,lf} \quad 0,10 \quad \text{OK}$$

$$u_{C_{\sigma,y,l_f}} = \frac{\sigma_{y,l_f,BC5}}{f_{yC,Rk,l_f}}$$

De sterkte van de lijfplaten belast op druk vormt geen probleem in het ontwerp van de fietsers- en voetgangersbrug. Geen enkele van de lagen in het laminaat van de lijfplaten bezwijkt onder de drukbelasting, zoals ook afgeleid kan worden uit de grafiek horende bij de toetsing op lamelniveau.

## 5.2 Stabiliteit van de lijfplaten

De stabiliteit van plaatvelden en schalen moet worden bepaald op plaatniveau en laminaatniveau. Voor eenvoudige plaatconfiguraties en belastingssystemen mag gebruik worden gemaakt van een analytische benadering die vermeld wordt in de CUR-aanbevelingen.

De invloed van imperfecties moet apart worden beschouwd door het toepassen van een reductiefactor  $\alpha$ . Deze reductiefactor moet worden bepaald door middel van testen of met de eindig-elementenmethode. De reductiefactor voor de invloed van imperfecties is afhankelijk van de oplegcondities, de slankheid en de belastingssituatie.

De invloed van orthotropie op de stabiliteit van de plaat moet worden meegenomen. Door orthotropie vertoont een plaat bij andere lengte/breedteverhoudingen staafgedrag in plaats van plaatgedrag zoals bij een isotrope plaat.

Onzekerheden in de analyse moeten in rekening worden gebracht met de partiële materiaalfactor voor stabiliteit.

De analytische formules vermeld in de CUR-aanbevelingen gelden enkel voor lange platen met een lengte/breedteverhouding ( $a/b$ ) groter dan 5 en met een orthotropo symmetrisch laminaat.

De stabiliteit van een plaat onder een **zuiver buigend moment** loodrecht op de plaatrand in het plaatveld moet worden getoetst met:

$$\frac{\sigma_{x,Ed,b}}{f_{x,Rd,b}} \leq 1,0$$

Met:

$\sigma_{x,Ed,b}$  Rekenwaarde van de optredende maximale normaalspanning in de lengterichting van de plaat;

$f_{x,Rd,b}$  Rekenwaarde van de knikweerstand;

$$f_{x,Rd,b} = \alpha \cdot \frac{\eta_c \cdot \sigma_{cr,b}}{\gamma_M}$$

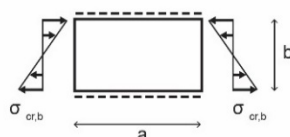
Met:

$\alpha$  Reductiefactor voor imperfecties;

$\sigma_{cr,b}$  Elastische kritieke knikspanning;

$\gamma_M$  Partiële materiaalfactor voor stabiliteit.

De bepaling van de  $\sigma_{cr,b}$  kan gebeuren via onderstaande formule.



$$\sigma_{cr,b} = \frac{\pi^2}{t_{lf} \cdot H_{brug}^2} \cdot [13,4 \cdot \sqrt{D_{11} \cdot D_{22}} + 10,4 \cdot (D_{12} + 2D_{66})]$$

Hierin zijn  $D_{11}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{12}$  en  $D_{66}$  de hulpgrootheden die rechtstreeks afgeleid kunnen worden uit de ABD-matrix van het laminaat. Als wordt aangenomen dat het laminaat bestaat uit een groot aantal lamellen

die over de dikte gelijkmatig zijn verdeeld, kan worden gewerkt met een vereenvoudigde D-matrix, die in bijlage C van de CUR-aanbevelingen wordt weergegeven. Deze is gebaseerd op de axiale laminaatstijfheden  $E_x$ ,  $E_y$  en  $G_{xy}$ , de dikte van het beschouwde laminaat en de poisson-factoren. De uitdrukkingen van de vereenvoudigde D-matrix worden hieronder weergegeven.

$$D_{11} = \frac{E_x \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})} \quad D_{22} = \frac{E_y \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}$$

$$D_{12} = \nu_{xy} \cdot D_{22} \quad D_{66} = \frac{G_{xy} \cdot t^3}{12}$$

In het geval van het rekenvoorbeeld worden de lijfplaten langs beide zijden gesteund door het PUR kernmateriaal. De schuimkern mag als verende steun worden beschouwd als de werking van de sandwich over de levensduur kan worden gegarandeerd. Het uitknikken van de lijfplaten door buiging zal bijgevolg in een zekere mate tegengehouden worden. Hierdoor zal het moeilijk zijn om de exacte normaalkracht te bepalen op de lijfplaten die nodig is voor het uitknikken. In de analyse van dit rekenvoorbeeld zal deze niet op een analytische manier bepaald worden. Indien uitknikken van de lijfplaten een belangrijke invloed zou kunnen hebben op de globale stabiliteit van het brugdek, dient een controle uitgevoerd te worden in eindige-elementensoftware.

### 5.3 Vermoeiing

Vermoeiing is in het beschouwde rekenvoorbeeld van de fietsers- en voetgangersbrug niet van toepassing. In deze whitepaper wordt vermoeiing enkel informatief meegegeven om een indicatie te geven van hoe het vermoeiingsontwerp verloopt en met eigenschappen rekening gehouden dient te worden. Aan het einde van dit onderdeel zal een vergelijking gegeven worden tussen de vermoeiing van een vezelversterkte kunststof en drie veel voorkomende kerfclassen in staal voor toepassingen in de bruggenbouw.

De amplitude van een cyclische belasting mag als constant worden beschouwd als het bereik en het gemiddelde van de wisselingen niet meer dan 10% varieert. Wordt hier niet aan voldaan, dan moet de vermoeiingsbelasting als een variabele-amplitudebelasting worden beschouwd. Bij een constante-amplitudebelasting moet de vermoeiingslevensduur bepaald worden met een S-N curve van hetzelfde materiaal en met dezelfde R-waarde, waarbij R gegeven wordt door onderstaande uitdrukking.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Voor de levensduurbepaling bij een vermoeiingsbelasting met een constante- of variabele-amplitudebelasting met een R-waarde waarvoor geen vermoeiingssterktekromme bekend is, moet de levensduur worden bepaald uit een constantelevensduurdiagram (CLD). De aan te houden R-waarden voor de CLD:

- 0,1 bij enkel wisselende trekbelasting
- -1 bij wisselende trek- en drukbelasting
- 10 bij enkel wisselende drukbelasting

Voor de relatie tussen lastwisselingen en gemiddeld aantal wisselingen tot falen (de vermoeiingssterktekromme) moet een dubbellogaritmische uitdrukking worden gebruikt, waarbij de parameters k en B uit lineaire regressie van testresultaten worden bepaald met  $\log(N)$  als afhankelijke variabele.

$$\log(N) = k \cdot \log\left(\frac{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_M \cdot \sigma_{max}}{\eta_c \cdot B}\right)$$

Met:

- N Aantal wisselingen tot breuk;
- K Regressieparameter af te leiden uit testen of tabel 6.7;
- B Karakteristieke sterkte van het laminaat na één cyclus, waarvoor als aanname de karakteristieke statische sterkte van het laminaat of de waarde uit tabel 6.7 in de CUR-aanbevelingen kan aangenomen worden;
- $\sigma_{max}$  Maximale spanning die optreedt tijdens een wisseling;
- $\gamma_{Mf}$  Materiaalfactor vermoeiing, die gelijk is aan 1,0 indien de spreiding op de gemeten spanningen niet meer dan 10-20% bedraagt.

Voor laminaten met  $35\% \leq V_f \leq 65\%$  en met minstens 12,5% vezels in alle hoofdrichtingen, mogen voor het bepalen van de vermoeiingssterktekrommen op laminaatniveau in vezelrichting de waarden gebruikt worden uit tabel 6.7 in de CUR-aanbevelingen. De parameters in de tabel zijn enkel geldig in het gebied tussen  $10^2$  en  $10^6$  wisselingen. Voor richtingen waarin de vermoeiingsbelasting niet direct door UD-lamellen wordt opgenomen, moet het vermoeiingsgedrag uit testen worden afgeleid.

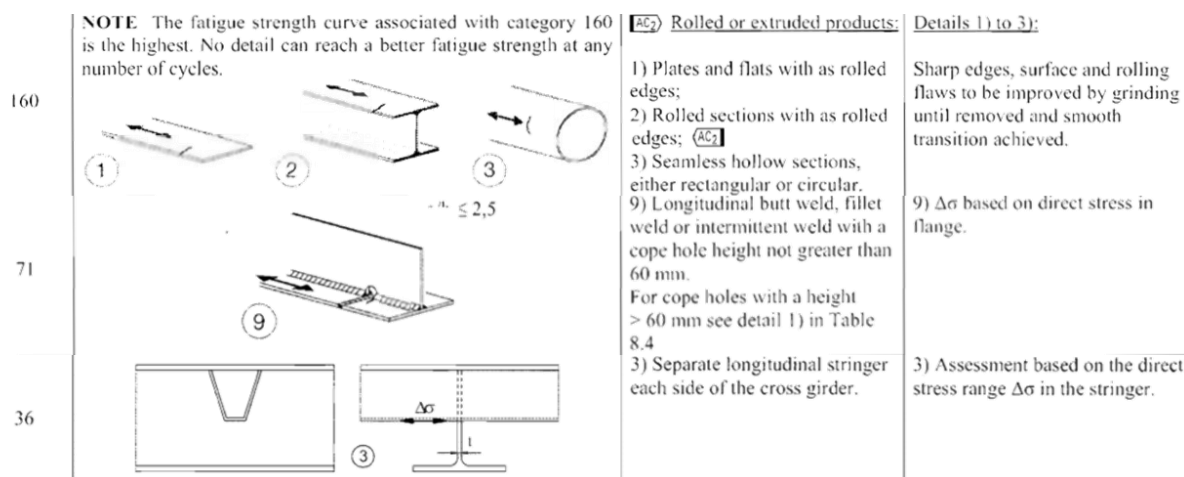
De beoordeling op vermoeiingsschade is gebaseerd op de lineaire schaderegel van Miner. Een component moet als bezwaken worden beschouwd indien het schadegetal D gelijk is aan 1. Het effect van de gecombineerde belastingen uit het belastingsspectrum wordt met deze methode berekend met verwaarlozing van volgorde-effecten.

Variabele-amplitudebelastingen mogen worden beschouwd als een combinatie van constante-amplitudebelastingen. Aanbevolen wordt de "Rainflow"-telmethode (regendruppelmethode) te gebruiken om een variabel amplitudesignaal om te zetten in groepen constante-amplitudewisselingen.

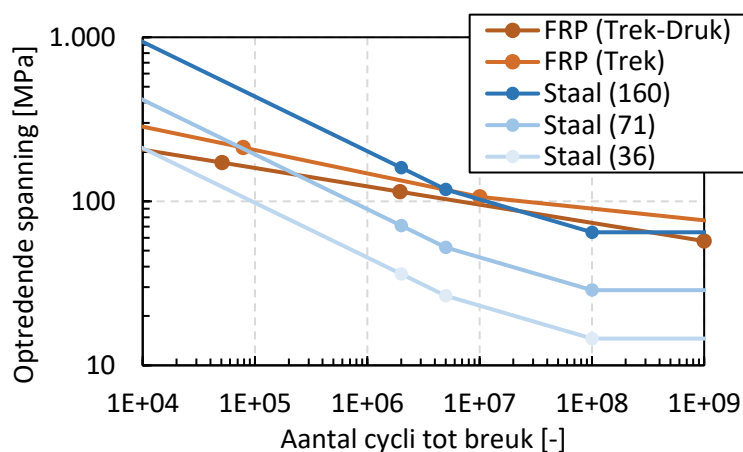
### 5.3.1 Vergelijking staal en VVK

In Grafiek 1 worden enkele kerfclassen van staal vergeleken met de vermoeiing van een VVK bestaande uit E-glas UD-legsels en een polyestermatrix met een 45% vezelvolumepercentage. Voor de kerfclassen werd gekozen voor enkele relevante klassen, weergegeven in Figuur 8, die terug te vinden zijn in de bruggenbouw. Zo is kerfklasse 160 de hoogste klasse die van toepassing is op maagdelijke warmgewalste profielen, kerfklasse 71 een vaak voorkomende klasse die gebruikt wordt voor lassen die aangelegd zijn in de langse richting van een profiel en kerfklasse 36 de laagste klasse die gebruikt wordt bij afzonderlijk geplaatste langsverstijvers langs beide zijden van een dwarsverstijver. Tevens werden alle materiaal- en conversiefactoren voor de VVK gelijkgesteld aan 1 zodat een goede vergelijking met het staal mogelijk is, aangezien daar geen correctiefactoren worden toegepast.



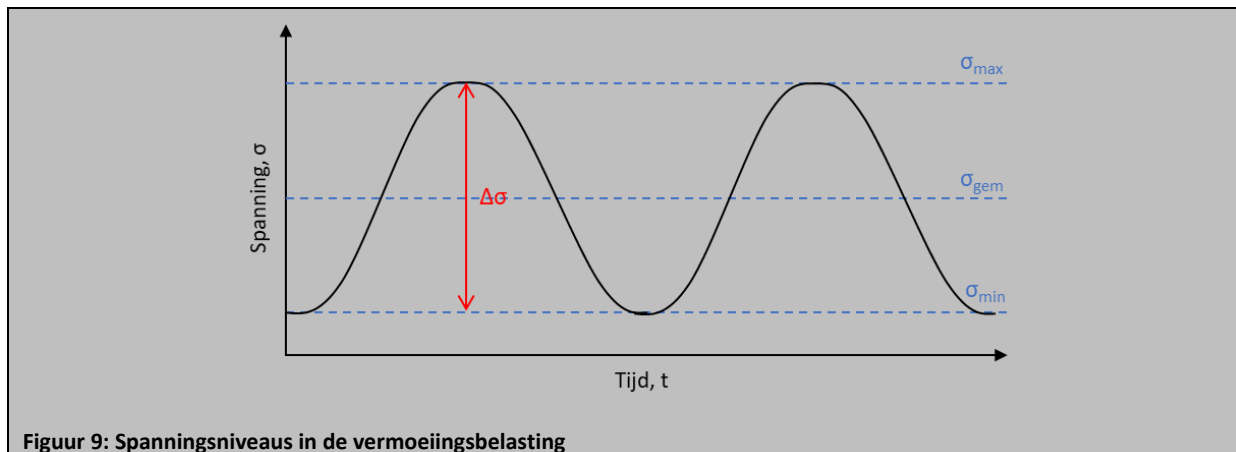


Figuur 8: Kerfclassen



Grafiek 1: Vergelijking vermoeiing van VVK en staal. Uit bovenstaande grafiek kan afgeleid worden dat in het gebied belangrijk voor de bruggenbouw, vanaf  $10^7$  cycli, de VVK's een voordeel hebben boven de meeste kerfclassen van staal. Op die manier kan geconcludeerd worden dat composietbruggen slechts een lage gevoeligheid voor vermoeiing zullen kennen.

**OPMERKING:** Bij de bepaling van de vermoeiingslevensduur bij een berekening met staal wordt gebruik gemaakt van  $\Delta\sigma$ , welke het verschil geeft tussen de minimale en maximale optredende spanning in het materiaal gedurende de vermoeiingsbelasting. In de berekening van de vermoeiingslevensduur van een composieten structuur zal echter gebruik worden gemaakt van de maximaal optredende spanning  $\sigma_{max}$  in het materiaal tijdens de vermoeiingsbelasting. Het is belangrijk dit verschil in de benaderingsmethode niet uit het oog te verliezen, zowel bij de berekening als de vergelijking van de vermoeiingslevensduur tussen het composietmateriaal en het staal.



Figuur 9: Spanningsniveaus in de vermoeiingsbelasting

## 5.4 Robuustheid

Aanvullend aan de besproken statische berekeningen, dient in de rekennota van een ontwerp de robuustheid van de brug in het geval van onvoorziene belastingen te worden verzekerd. Dit valt echter buiten het bereik van deze whitepaper en de bijhorende rekentool.

## 6 GEBRUIKSGRENSTOESTAND (GGT)

Aangetoond moet worden dat de constructie gedurende de levensduur voldoet aan de criteria die horen bij de gebruiksgrenstoestand zoals:

1. Vervormingen die het uiterlijk van de constructie, het comfort van mensen en het functioneren van de constructie aantasten of schade toebrengen aan niet-constructieve elementen of aangebrachte afwerkingen;
2. Trillingen die ongemak voor mensen veroorzaken of de functie van de constructie beperken;
3. Schade die nadelig uitwerkt op het uiterlijk, de duurzaamheid of het functioneren van de constructie.

De criteria en belastingen die volgen uit de functie van de constructie moeten worden bepaald en worden gehanteerd bij het toetsen van de gebruiksgrenstoelstanden.

Bij de berekening van vervormingen en het trillingsgedrag moet rekening worden gehouden met effecten op de stijfheid van het materiaal door omgevingscondities en veroudering.

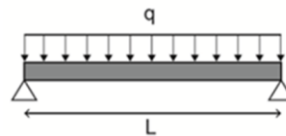
In de berekeningen wordt de brug vereenvoudigd tot een balk die op de twee steunpunten eenvoudig is opgelegd. Volgende criteria zijn van toepassing voor de toetsing van de bruikbaarheid van de brug.

- Een minimale eigenfrequentie van 3,0 Hz in onbelaste toestand, die tot uiting komt in trillingen ten gevolge van bijvoorbeeld wind en verkeer nabij de brug;
- Een minimale eigenfrequentie van 2,2 Hz onder belasting van de voetgangersstroom, zodat in een latere fase voldaan kan worden aan de comforteisen voor voetgangersbruggen;
- Een maximale zakking van  $w_{\max} = L_{\text{brug}}/250 = 64$  mm door tijdelijke belastingen;
- Een minimale helling van  $\phi_{\min} = 1\%$  voor een goede afwatering van het brugdek;
- Een maximale helling van  $\phi_{\max} = 4\%$  voor de toegankelijkheid van de brug.

### 6.1 Doorbuiging

De totale doorbuiging in het midden ( $w_{\text{tot}}$ ) kan berekend worden aan de hand van de balkformules. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de term die de doorbuiging ten gevolge van de dwarskrachtvervorming beschrijft. Hieronder kan de formule teruggevonden worden voor de

doorbuiging voor een op twee steunpunten scharnierend opgelegde balk met een overspanning  $L$ , belast door een gelijkmatig verdeelde belasting  $q$ .



$$w_{tot} = \frac{5}{384} \frac{q \cdot L^4}{\sum_i E_i I_i} + \eta \frac{1}{8} \frac{q \cdot L^2}{\sum_i G_i A_i}$$

Met  $\eta$  een correctiefactor waarvoor geldt:

- $\eta = 1,2$  voor een rechthoekige massieve doorsnede
- $\eta = 2,0$  voor een dunwandige buis met cirkelvormige doorsnede
- $\eta = 1,0$  voor een dunwandige koker met rechthoekige doorsnede of I-ligger

In het rekenvoorbeeld kan het brugdek beschouwd worden als een aaneenschakeling van dunwandige I-liggers waardoor de bovenstaande factor gelijkgesteld kan worden aan 1.

De doorbuiging van de brug ten gevolge van belastingscombinaties 3 en 4 wordt bepaald met de bovenstaande balktheorie, waarbij ook de doorbuiging door afschuiving wordt meegenomen.

Doorbuiging door de uniform verdeelde belasting:

$$w_{BC3,lt} = \frac{5}{384} \frac{\gamma_{M,GGT} \cdot \gamma_{G,GGT} \cdot q_{fk} \cdot B_{nut} \cdot L_{span}^4}{E I_X \cdot \eta_{ck,d}} + \frac{1}{8} \frac{\gamma_{M,GGT} \cdot \gamma_{G,GGT} \cdot q_{fk} \cdot B_{nut} \cdot L_{span}^2}{G_{A_{XY}} \cdot \eta_{ck,d}}$$

$$= 57,07 \text{ mm}$$

Doorbuiging door dienstvoertuig:

$$w_{BC4,lt} = \frac{1}{48} \frac{\gamma_{M,GGT} \cdot \gamma_{Q,GGT} \cdot Q_{svA} \cdot (L_{span} - L_{svA})}{E I_X \cdot \eta_{ck,d}} \cdot [2 \cdot L_{span} \cdot (L_{span} + L_{svA}) - L_{svA}^2]$$

$$+ \frac{1}{4} \frac{\gamma_{M,GGT} \cdot \gamma_{Q,GGT} \cdot Q_{svA} \cdot L_{span}}{G_{A_{XY}} \cdot \eta_{ck,d}} = 14,80 \text{ mm}$$

Toelaatbaarheidscontrole:

$$uc_{w_{BC3,lt}} = \frac{w_{BC3,lt}}{w_{max}} = 0,89 \quad OK \quad uc_{w_{BC4,lt}} = \frac{w_{BC4,lt}}{w_{max}} = 0,23 \quad OK$$

### Opmeten bij doorbuigingsproef

De opgemeten waarde van de doorbuiging kort na de fabricage van de composietbrug bij een in-situ statische belastingsproef met verdeelde belasting kan niet rechtstreeks vergeleken worden met de hierboven berekende waarde. In de berekening werd namelijk gebruik gemaakt van verschillende materiaal- en conversiefactoren die de stijfheidsreducerende invloeden van de ouderdom en de omgeving in rekening brengen. Kort na de productie zullen deze invloeden nog niet belangrijk zijn, waardoor de gemeten doorbuigingswaarde lager zal liggen dan hierboven berekend.

Het is daarom belangrijk om de gemeten waarde bij een in-situ statische belastingsproef te vermenigvuldigen met de verschillende materiaal- en conversiefactoren om een zicht te krijgen op de doorbuiging van de composietbrug na een vooropgestelde levensduur. De bekomen waarde inclusief de materiaal- en conversiefactoren kan vervolgens vergeleken worden met het in het ontwerp vooropgestelde criterium (bv.  $L/250$ ).

Omgekeerd kan ook de doorbuiging zonder de invloed van de ouderdom en de omgeving berekend en vergeleken worden met de kort na productie gemeten waarde van de doorbuiging, dit door de

verschillende materiaal- en conversiefactoren gelijk te stellen aan 1,00. In het rekenvoorbeeld hierboven wordt de doorbuiging onder de uniforme verdeelde belasting

$$w_{BC3,kt} = 46,23 \text{ mm}$$

en onder het dienstvoertuig

$$w_{BC4,kt} = 11,99 \text{ mm}$$

De ontwerpwaarden zoals deze hierboven berekend zijn met inbegrip van de coëfficiënten die rekening houden met de gevolgen van de ouderdom en de omgevingscondities, zijn respectievelijk gelijk aan 57,07 mm onder de verdeelde belasting en 14,80 mm onder het dienstvoertuig. Hierbij wordt een verschil van respectievelijk 10,84 mm en 2,81 mm bekomen tussen de berekende doorbuiging en de werkelijke doorbuiging tijdens een belastingsproef, wat ongeveer neerkomt op een 23% overschatting van de reële waarde.

## 6.2 Zeeg

De minimale zeeg die tijdens de productie dient voorzien te worden om de ogenblikkelijke doorbuiging door het eigengewicht van het brugdek te reduceren wordt in deze sectie berekend. Voor het eigengewicht van de brug wordt rekening gehouden met het gewicht van de brug inclusief de slijtlaag en het gewicht van de roestvast stalen leuning aan de beide zijden van het brugdek. Dit eigengewicht kan teruggevonden worden in sectie 4.1.

Gebruik makende van de balkformules kan de onmiddellijke doorbuiging en de doorbuiging onder het eigengewicht met de gereduceerde buig- en de afschuivingsstijfheid van het brugdek berekend worden. De reductie van de eigenschappen van het brugdek gebeurt door middel van de conversiefactor  $\eta_{cl,d}$ , welke rekening houdt met temperatuureffecten en effecten door water(damp), vermoeiing en kruip. De zeeg aan het einde van de ontwerplevensduur wordt berekend als:

$$w_{EG,lt} = \frac{5}{384} \frac{q_{EG} \cdot B_{brug} \cdot L_{span}^4}{EI_Y \cdot \eta_{cl,d}} + \frac{1}{8} \frac{q_{EG} \cdot B_{brug} \cdot L_{span}^2}{GA_{XY} \cdot \eta_{cl,d}} = 29 \text{ mm}$$

$$w_{EG,kt} = w_{EG,lt} \cdot \eta_{cl,d} = 17 \text{ mm}$$

Om een goede afwatering van het brugdek te bekomen zal het brugdek met een minimale langse helling  $\theta_{min}$  van 1% dienen geproduceerd te worden, dat in rekening gebracht wordt door het gedeelte  $Z_{min}$  van de zeeg.

$$Z_{min} = \phi_{min} \cdot \frac{L_{span}}{2} = 79 \text{ mm}$$

De minimaal geproduceerde zeeg voor het brugdek die na de levensduur nog steeds voldoet aan de minimale helling voor de afwatering, is de som van de bovenstaande zegen.

$$Z_{tot} = Z_{min} + w_{EG,lt} = 108 \text{ mm}$$

De initiële helling van het brugdek net na de productie is:

$$\phi_{kt} = \frac{Z_{tot} - w_{EG,kt}}{L_{span}/2} \cdot 100\% = 1,16\% < 4,00\%$$

Deze helling is nog steeds kleiner dan de maximaal toelaatbare helling  $\phi_{max}$  die nodig is voor de toegankelijkheid van de brug voor fietsers en voetgangers.

De kromtestraal van het brugdek wordt dan:

$$R_{min} = \frac{1}{2}Z_{tot} + \frac{L_{span}^2}{8Z_{tot}} = 288 \text{ m}$$

### 6.3 Eigenfrequentie

De eigenfrequentie en het trillingsgedrag moeten worden bepaald in de situatie met en zonder invloeden van de omgeving en veroudering. Analoog als in de doorbuigingsberekening wordt in het eerste geval gerekend met een gereduceerde stijfheid voor het ontwerp van de composietbrug. In het tweede geval worden de materiaal- en conversiefactoren gelijkgesteld aan 1, zodat met de werkelijke stijfheid van de composietbrug net na plaatsing gerekend wordt en de werkelijke eigenfrequentie gecontroleerd kan worden met de gemeten waarde tijdens een in-situ proef op de brug.

Bij het bepalen van de eigenfrequentie van de draagconstructie moet de massa van de belasting die de trilling veroorzaakt worden meegenomen in de beoordeling als de massa van de belasting meer bedraagt dan 5% van het eigengewicht van de draagconstructie.

Het betreft hier een brug die als eenvoudig opgelegde balk is te beschouwen. Voor de laagste eigenfrequentie van een dergelijke balk geldt:

$$f(K_n; d_{TC}) = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EI_Y \cdot g}{\gamma_{M,GGT} \cdot \left[ q_{EG} \cdot B_{brug} / \eta_{cl,t} + d_{TC} \cdot P \cdot B_{nut} / \eta_{ck,t} \right] \cdot L_{span}^4}}$$

Hierin is  $K_n$  een constante die afhankelijk is van de gekozen randcondities en welke harmonisch wordt beschouwd. Voor een tweezijdig eenvoudig opgelegde balk geldt:  $K_n = 9,87$ . De dichtheid van de voetgangersstroom  $d_{TC}$  en het gewicht van een enkele persoon  $P$  werden reeds in Tabel 19 vastgelegd als  $0,5 \text{ P/m}^2$  en  $800 \text{ N}$  respectievelijk.

De resulterende laagste eigenfrequentie in onbelaste toestand van de fietsers- en voetgangersbrug is:

$$f_{0,onbel,lt} = f(K_n; d_{TC} = 0)$$

Deze toetsing is voornamelijk belangrijk voor trillingen ten gevolge van wind en verkeer in de omgeving van de brug zodat deze geen onaanvaardbare vervormingen/verplaatsingen kunnen veroorzaken.

De resulterende laagste eigenfrequentie in belaste toestand is:

$$f_{0,bel,lt} = f(K_n; d_{TC} = var.)$$

De berekende eigenfrequenties worden vervolgens getoetst:

$$u_{cf_{0,onbel,lt}} = \frac{f_{min,onbel}}{f_{0,onbel,lt}} \quad u_{cf_{0,bel,lt}} = \frac{f_{min,bel}}{f_{0,bel,lt}}$$

Voor de keuze van de dichtheid van de voetgangersstroom werd gebruik gemaakt van het wetenschappelijk en technisch rapport "Ontwerp van lichtgewicht voetgangersbruggen voor mensgeïnduceerde trillingen" (JRC-document "Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations"), waarin vijf verschillende typische verkeerssituaties vooropgesteld worden die zich kunnen voordoen op een voetgangersbrug. Deze opdeling is weergegeven in Tabel 21.

Tabel 21: Verkeerssituaties op voetgangersbrug

Verkeerssituatie	$d_{TC}$	Beschrijving
VS1	$\min\left\{\frac{15}{A_{nut}}; 0,10\right\}$	Zeer weinig verkeer: Groep van 15 personen verdeeld over de brug.
VS2	0,2	Weinig verkeer: Comfortabel en vrij wandelen met de mogelijkheid om andere voetgangers voorbij te steken. Een persoon kan vrij bewegen op de brug.
VS3	0,5	Dicht verkeer: Nog steeds mogelijk om onbelemmerd te wandelen. Inhalen van andere voetgangers kan gebeuren mits tussenpozen.
VS4	1,0	Zeer dicht verkeer: Vrijheid van de beweging is beperkt met een belemmerde mogelijkheid om te wandelen. Andere voetgangers voorbijsteken is niet mogelijk.
VS5	1,5	Uitzonderlijk dicht verkeer: Onaangenaam wandelen gecombineerd met een overbevolking van de brug. Een persoon kan niet vrij bewegen op de brug.

De resultaten van de toetsing voor elk van de verkeerssituaties worden weergegeven in Tabel 22.

Tabel 22: Toetsing eigenfrequenties

Verkeerssituatie (VS)	$d_{TC}$ [P/m <sup>2</sup> ]	$f_{0,onbel,lt}$ [Hz]	$f_{0,bel,lt}$ [Hz]	$UC_{f0,onbel,lt}$ [-]	$UC_{f0,bel,lt}$ [-]
Geen	0,0	3,94		0,76	
VS1	0,1		3,85		0,57
VS2	0,2		3,76		0,58
VS3	0,5		3,54		0,62
VS4	1,0		3,24		0,68
VS5	1,5		3,00		0,73

De eigenfrequenties in onbelaste en belaste toestand zijn hoger dan 3,0 Hz en 2,2 Hz respectievelijk. De brug voldoet dus aan de eigenfrequentiecriteria.

#### Opmeten bij trillingsproef

Net zoals in sectie 6.1 besproken bij het opmeten van de doorbuiging van een composieten brug onder een statische belasting, zal ook de gemeten waarde voor de eigenfrequentie uit een trillingsproef vermenigvuldigd dienen te worden met de verschillende van toepassing zijnde materiaal- en conversiefactoren.

De waarde van de eigenfrequentie die gemeten wordt op een composietbrug kort na de productie kan vergeleken worden met de hierna berekende waarde zonder toedoen van de materiaal- en conversiefactoren. In onbelaste toestand is dit gelijk aan

$$f_{0,onbel,kt} = 4,38 \text{ Hz}$$

in belaste toestand onder een voetgangersstroom van 0,5 P/m<sup>2</sup> wordt dit

$$f_{0,bel,kt} = 3,93 \text{ Hz}$$

In het ontwerp van de composietbrug werd voor deze twee situaties respectievelijk een waarde van 3,94 Hz en 3,76 Hz bekomen op lange termijn, wat neerkomt op een overschatting van 4 à 10% van de werkelijke situatie na het uitvoeren van de brug.

## 6.4 Comfort

Voor de controle van het comfort wordt gekeken naar de maximale verticale versnelling van de brug onder de voetgangersstroom van 0,5 P/m<sup>2</sup>. Als richtlijn zal gebruik gemaakt worden van het JRC-document.

Het comfort van een fietsers- en voetgangersbrug wordt ingedeeld volgens comfortklassen aan de hand van limietwaarden voor de verticale versnelling van het brugdek, zoals weergegeven in Tabel 23.

Tabel 23: Comfortklassen

Comfortklasse	Mate van comfort	Verticale versnellingslimiet, $a_{lim,vert}$ [m/s <sup>2</sup> ]
CK1	Maximaal	< 0,50
CK2	Middelmatig	0,50 – 1,00
CK3	Minimaal	1,00 – 2,50
CK4	Onacceptabel ongemak	> 2,50

De maximaal optredende verticale versnelling van het brugdek kan via de volgende formule berekend worden:

$$a_{max,vert} = k_{a,95\%} \sqrt{\frac{C \cdot \sigma_F^2}{M_i^2} \cdot k_1 \cdot \xi^{k_2}}$$

Met:

$k_{a,95\%}$  95<sup>ste</sup> percentiel van de piekfactor voor de transformatie van de standaarddeviatie van de spanning naar de karakteristieke ontwerpwaarde van de verticale versnelling in de gebruiksgrenstoestand;

$C$  Constante voor het spectrum van de maximale belasting;

$\sigma_F^2$  Variatie op de belasting (geïnduceerd door de voetgangersstroom);

$$\sigma_F^2 = k_F \cdot n$$

Met:

$k_F$  Constante [kN<sup>2</sup>];

$n = d_{TC} \cdot L_{brug} \cdot B_{nut}$  Het aantal voetgangers op de brug;

$M_i$  Modale massa van de beschouwde trillingsvorm  $i$ ;

$k_1, k_2$  Constanten afhankelijk van de voetgangersdichtheid;

$$k_1 = a_1 f_i^2 + a_2 f_i + a_3$$

$$k_2 = b_1 f_i^2 + b_2 f_i + b_3$$

Met:

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$  Constanten;

$\xi$  Dempingsverhouding van de structuur.

De waarde van de demping van het materiaal is afhankelijk van veel factoren, waaronder constructiedetails, de vezeloriëntaties en het vezelvolumegehalte. De demping van een constructie is door de aanwezigheid van verbindingen in het algemeen groter. De demping van een laminaat of van

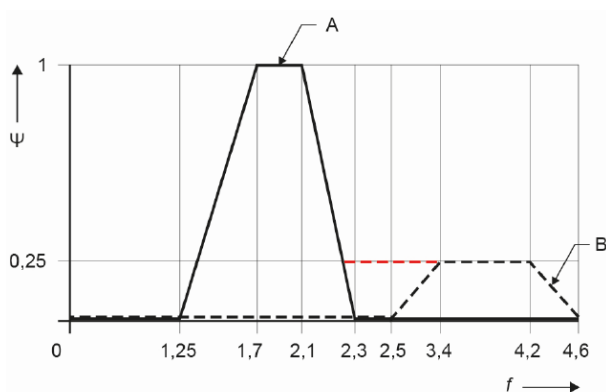
een constructie kan worden gemeten met de Dynamische Mechanische Analyse (DMA). In de CUR-aanbevelingen wordt een dempingsverhouding voor glasvezelversterkte kunststoffen naar voren geschoven met een minimale waarde van 0,5% en een gemiddelde waarde van 1,0%. Echter zal de demping van een brugdek in de praktijk veelal een grotere waarde aannemen door de aanwezige randvoorwaarden en oplegcondities. Hogere dempingswaarden dan genoemd in de CUR-aanbevelingen en dempingswaarden voor afwijkende materialen moeten door representatieve experimentele data zijn onderbouwd. In het geval van het rekenvoorbeeld wordt een dempingsverhouding  $\xi$  van 3% gebruikt. Deze waarde is hoger dan de waarde in de CUR. Metingen in Vlaanderen op bruggen van het type zoals afgebeeld op Figuur 1 geven dempingsverhoudingen tussen 1 en 3%. Desalniettemin blijkt deze rekenwijze bijzonder gevoelig voor composietbruggen. Dit is een gevolg van het niet opnemen van de mens geïnduceerde demping, die voor dit type bruggen van groot belang is. Zodoende verdient het aanbeveling terughoudend te zijn in het gebruik van louter op berekeningen gebaseerde comforteisen.

Tabel 24 geeft de constanten voor de berekening van de verticale versnelling weer voor verschillende voetgangersstromen (dichtheden).

Tabel 24: Constanten in comfortanalyse

$d_{TC}$ [P/m <sup>2</sup> ]	$k_F$ [kN <sup>2</sup> ]	C [-]	$a_1$ [-]	$a_2$ [-]	$a_3$ [-]	$b_1$ [-]	$b_2$ [-]	$b_3$ [-]	$k_{a,95\%}$ [-]
$\leq 0,5$	$1,20 \times 10^{-2}$	2,95	-0,07	0,60	0,075	0,003	-0,040	-1,000	3,92
1,0	$7,00 \times 10^{-3}$	3,70	-0,07	0,56	0,084	0,004	-0,045	-1,000	3,80
1,5	$3,34 \times 10^{-3}$	5,10	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	3,74

Aan de hand van de waarden uit de bovenstaande tabel en de opgegeven formule kan de maximaal optredende versnelling van het brugdek onder een voetgangersstroom van 0,5 P/m<sup>2</sup> berekend worden. Uit dit resultaat kan de ontwerpwaarde  $a_{d,vert}$  van de verticale versnelling van het brugdek teruggevonden worden door het te vermenigvuldigen met een reductiecoëfficiënt  $\psi$ , welke de waarschijnlijkheid dat de stapfrequentie het kritieke bereik van de eigenfrequenties van de brug benadert, in rekening brengt. Deze reductiecoëfficiënt is tevens afhankelijk van de eigenfrequentie onder invloed van een voetgangersstroom (in belaste toestand) van de brug, zoals weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10: Reductiecoëfficiënt verticale versnelling

$$a_{d,vert} = \psi \cdot a_{max,vert}$$

De resultaten van de comfortberekening voor de verschillende verkeerssituaties zijn weergegeven in Tabel 25.



Tabel 25: Resultaten comfortanalyse

	$d_{TC}$ [P/m <sup>2</sup> ]	$a_{max,vert}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\Psi$ [-]	$a_{d,vert}$ [m/s <sup>2</sup> ]	Comfortklasse
VS1	0,1	2,77	0,25	0,69	CK2
VS2	0,2	3,90	0,25	0,98	CK2
VS3	0,5	6,08	0,25	1,52	CK3
VS4	1,0	6,69	0,25	1,67	CK3
VS5	1,5	6,01	0,25	1,50	CK3

De brug kan geklasseerd worden in CK3 met een minimaal comfort voor de voetgangers bij een voetgangersstroom van 0,5 P/m<sup>2</sup>.

## 7 EXCEL REKENTOOL

Het in de vorige secties beschreven analytische proces voor de berekening van een composieten fietsers- en voetgangersbrug werd in het kader van C-Bridge geïmplementeerd in een Excel rekentool welke een eerste inschatting van het materiaalgebruik geeft en de belangrijkste unity checks bij het ontwerp zal uitvoeren.

### 7.1 Bereik en doelstelling van de rekentool

De rekentool is opgesteld voor het ontwerp van composieten fietsers- en voetgangersbruggen met een dubbelzijdige eenvoudige oplegging of dubbelzijdige inklemming. De rekentool is bijgevolg enkel van toepassing op bruggen met een enkelvoudige overspanning. Bruggen met meervoudige overspanningen of andere randvoorwaarden ter plaatse van de steunpunten, vallen buiten het kader van de rekentool.

Slechts een beperkt aantal controles wordt uitgevoerd in de rekentool, welke besproken worden in secties 7.3.6 tot 7.3.10. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in de praktijk een diepgaandere studie door een studiebureau vereist is, waarin aanvullende controles uitgevoerd worden, bv. omtrent stabiliteit en robuustheid.

De gebruiker dient enkel het tabblad 'Input-Output' te gebruiken aangezien hier de invoerparameters en de resultaten van de controles worden weergegeven. De inputgegevens zijn ingedeeld in de niveaus 'basic input', 'intermediate input' en 'advanced input', naargelang het niveau van detaillering en specialisatie. Onder 'basic input' zijn de eenvoudigste ontwerpgegevens verzameld, waarvoor geen diepgaande kennis omtrent composietbruggen is vereist. Het aanpassen van deze gegevens faciliteert een eerste, snelle toetsing, bv. in een vergelijkende studie met alternatieve bouwmaterialen. De niveaus 'intermediate input' en 'advanced input' laten toe het ontwerp op een gedetailleerder niveau naar de hand te zetten en vergen bijgevolg meer kennis van zaken. De inputgegevens onder deze niveaus zijn standaard ingevuld met courante waarden en dienen slechts met de meeste zorg aangepast te worden door gekwalificeerde personen.

Aldus is deze rekentool geschikt voor personen met verschillende kennisniveaus op vlak van composieten. Een beginnend gebruiker kan een snelle vergelijking uitvoeren via het niveau 'basic input', terwijl vakkundige ingenieursbureaus en aannemers meer in detail kunnen gaan met de niveaus 'intermediate input' en 'advanced input'.

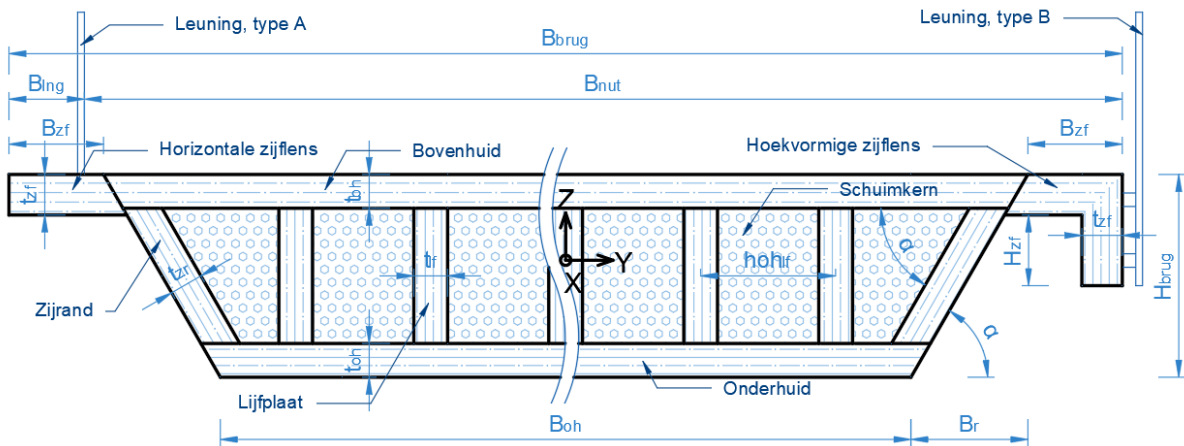
De output is eveneens opgedeeld in een basic output met de belangrijkste resultaten en een meer gedetailleerde output.

### 7.2 Aangenomen dwars- en langsdoorsnede

Figuur 11 toont de dwarsdoorsnede die wordt aangenomen in de berekening met daarop de definiëring van de benodigde afmetingen. De linker- en rechterzijde van deze doorsnede tonen aan hoe de randen op verschillende manieren kunnen uitgevoerd worden, hoewel een werkelijke doorsnede steeds symmetrisch is. De doorsnede bestaat uit een boven- en onderflens, een zeker aantal lijfplaten en twee zijranden die onder een bepaalde hoek kunnen geplaatst worden. Verder bestaat de mogelijkheid een horizontale of hoekvormige zijflens toe te voegen. Tussen de laminaten kan al dan niet een licht materiaal geplaatst worden als vulling.

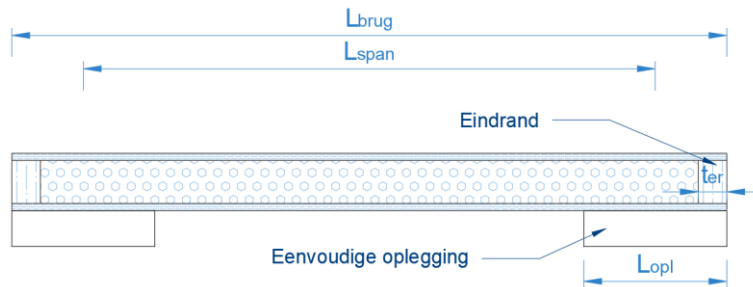
De leuning kan rechtstreeks op het brugdek geplaatst worden, aangeduid als leuningtype A, of kan bevestigd worden aan de zijrand indien die verticaal is of aan het verticale gedeelte van een hoekvormige zijflens, aangeduid als type B. In het eerste geval beïnvloedt de positie van de leuning de nuttige breedte van de brug, die als gevolg kleiner is dan de totale breedte.

Zoals ook opgemerkt bij Figuur 2 zijn onderstaande figuren louter indicatief en niet bedoeld een realistische representatie van de constructiedetails weer te geven.

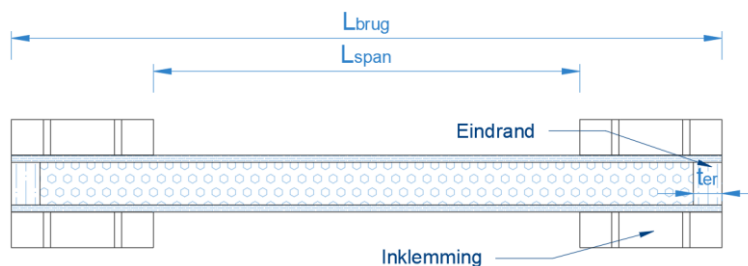


**Figuur 11: Aangenomen dwarsdoorsnede, afmetingen buiten proportie**

De langsdoorsnedes van een eenvoudig opgelegde en dubbelzijdig ingeklemde brug worden weergegeven in Figuur 12 en Figuur 13 respectievelijk.



**Figuur 12: Aangenomen langsdoorsnede, eenvoudig opgelegd, afmetingen buiten proportie**



**Figuur 13: Aangenomen langsdoorsnede, dubbelzijdig ingeklemd, afmetingen buiten proportie**

Op de langsdoorsnede zijn de eindranden zichtbaar, die een luchtdicht geheel van laminaten verzekeren. Afhankelijk van de randcondities wordt de overspanning  $L_{span}$  van de brug op een verschillende wijze berekend uit de totale lengte  $L_{brug}$  en de lengte van de opleggingen  $L_{opl}$ .

### 7.3 Gebruik van de rekentool: 'Input - Output'-tabblad

In de volgende secties wordt elk van de onderdelen toegelicht volgens de volgorde waarin ze in de rekentool aan bod komen, aan de hand van screenshots uit de rekentool. In deze screenshots staan de inputvelden ingevuld met de gegevens van de brug van het rekenvoorbeeld van de vorige secties.

#### 7.3.1 Basic input

Een screenshot van de basic input is weergegeven in Figuur 14. In de lichtblauwe cellen wordt telkens input van de gebruiker verwacht. De donkere cellen geven een berekend resultaat weer, dat bijgevolg niet aangepast kan worden.

Basic input		Geen optimalisatie	
Basic input	Optimalisatie naar		
	Lengte brugdek	$L_{brug}$ [m]	16.00
	Overspanning	$L_{span}$ [m]	15.80
	Breedte brugdek	$B_{brug}$ [m]	4.40
	Nuttige breedte	$B_{nut}$ [m]	4.00
	Breedte bovenflens	$B_{ot}$ [m]	4.40
	Breedte onderflens	$B_{ot}$ [m]	4.01
	Bouwhoogte (handmatige invoer)	$H_{brug}$ [m]	0.60
	Bouwhoogte	$H_{brug}$ [m]	0.60
	Slankheid	$\lambda$ [-]	26.67

**Figuur 14: Basic input**

De basic input omvat de basisgegevens van de geometrie van de brug, zijnde de lengte, breedte en bouwhoogte. Hiertussen worden reeds enkele nauw verwante berekende waarden weergegeven, waaronder de overspanningslengte, nuttige breedte, breedte van de onderflens en slankheid van het dek.

In de basic input kan verder ook een optimalisatie ingesteld worden. Dit wordt toegelicht in sectie 7.4.

#### 7.3.2 Basic output

Net onder de basic input wordt een beknopt overzicht gegeven van de resultaten in de basic output, met daarin de massa van de brug en een indicatie of de verschillende criteria voldaan zijn of niet, zoals weergegeven in Figuur 15. In geval van een optimalisatie wordt hier getoond welk criterium het meest bepalend is gebleken voor het ontwerp.

Basic output			
Basic output	Meest bepalende criterium in geval van optimalisatie	Geen optimalisatie	
	Massa brug (structureel + slijtlaag + leuning)	$M_{brug,tot}$ [kg]	10862
	Massa brug (structureel)	$M_{brug,str}$ [kg]	8713
	Eigenfrequentie		OK
	Doorbuiging		OK
	Verticale versnelling		OK
	Sterkte van de huiden		OK
	Sterkte van de lijfplaten		OK

Figuur 15: Basic output

### 7.3.3 Intermediate input

In de intermediate input worden meer gedetailleerde ontwerpwaarden ingegeven waarvoor een hoger kennisniveau is vereist. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 16.

Intermediate input			
Intermediate input	Randcondities		Eenvoudig opgelegd
	Lengte oplegging	$L_{opl}$ [m]	0.200
	Hoek van zijranden met horizontale	$\alpha$ [°]	72.0
	Breedte randstuk	$B_r$ [m]	0.195
	Breedte vrijgehouden voor leuning	$B_{ing}$ [m]	0.200
	Massa leuning		Handmatige invoer
	Massa leuning (handmatige invoer)	$\rho_{ing}$ [kg/m]	11.03
	<b>Laminaten</b>		
	Dikte bovenflens (handmatige invoer)	$t_{of}$ [mm]	14.0
	Dikte bovenflens	$t_{of}$ [mm]	14.0
	Instelling dikte onderflens		Zelfde als bovenflens
	Dikte onderflens	$t_{of}$ [mm]	14.0
	Instelling zijflenzen		Geen zijflenzen
	<b>Lijnplaten</b>		
Instelling dikte lijfplaten		Handmatige invoer	
Dikte lijfplaten (handmatige invoer)	$t_{lf}$ [mm]	6.0	
Dikte lijfplaten	$t_{lf}$ [mm]	6.0	
Hart-op-hartafstand lijfplaten	$h_{ohlf}$ [m]	0.200	
Instelling dikte zijranden		Handmatige invoer	
Dikte zijranden (handmatige invoer)	$t_{zr}$ [mm]	25.0	
Dikte zijranden	$t_{zr}$ [mm]	25.0	
Dikte eindranden	$t_{er}$ [mm]	8.0	

Figuur 16: Intermediate input

Vooreerst kunnen de randcondities ingesteld worden. Wanneer geopteerd wordt voor een dubbelzijdige inklemming, dient opgemerkt te worden dat hoewel dit leidt tot een gunstige slankheid, dit ook gepaard gaat met een aanzienlijke impact op de vereisten op de funderingen. Bovendien wordt bij de lengte van de brug geen rekening gehouden met de ingeklemde lengtes en zal het werkelijke materiaalverbruik een stuk hoger zijn dan in de rekentool opgegeven.

De eerste invoergrootheden onder het intermediate niveau zijn de lengte van de opleggingen, de hoek van de zijranden, de breedte vrijgehouden voor de leuning en de massa van de leuning. De hoek van de zijranden bepaalt het breedteverschil tussen onder- en bovenflens. Deze hoek heeft een bepaalde ondergrens zodanig dat dit breedteverschil niet groter kan worden dan de hart-op-hartafstand tussen de lijfplaten. De breedte van de leuning bepaalt de nuttige breedte. De massa van de leuning kan gekozen worden uit een lijst met standaardwaarden of kan handmatig ingevoerd worden.

Verder worden hier de diktes van elk van de laminaten ingevuld. Dit kan variëren tussen de vastgelegde realistische grenswaarden 8 mm en 50 mm. Lijfplaten kunnen nog enigszins dunner ingesteld worden,

met een minimum van 5 mm. Ter bevordering van het gebruiksgemak kan ervoor gekozen worden de verschillende laminaatdiktes aan elkaar te koppelen, zodat ze niet elk handmatig aangepast dienen te worden wanneer het geheel van de laminaten lichter of zwaarder moet worden. De dikte van de bovenflens dient hierbij als richtwaarde. Door deze waarde aan te passen, veranderen de andere laminaatdiktes proportioneel mee, met uitzondering van de eindranden omdat deze geen dragende functie hebben. Uiteraard bestaat ook de mogelijkheid elk van de diktes handmatig in te geven. Indien zijflenzen gewenst zijn, kan dit hier ingesteld worden, waarna ook de bijhorende geometrie dient ingegeven te worden.

Ten slotte valt ook de hart-op-hartafstand tussen de lijfplaten onder de intermediate input. Deze kan variëren tussen 5 en 30 cm en bepaalt samen met de breedte van de onderflens hoeveel lijfplaten de brug bevat.

#### 7.3.4 Advanced input

Het eerste deel van de advanced input, weergegeven in Figuur 17, bevat enkele gedetailleerde waarden die een invloed hebben op de controleberekeningen. De dichtheid van de voetgangersstroom kan opgegeven worden aan de hand van een keuzelijst voor twee verschillende ontwerpsituaties. Aan elke ontwerpsituatie wordt daarbovenop een comfortklasse gekoppeld die onder de beschouwde voetgangersstroom behaald moet worden. Indien één van de minimale comfortklassen niet ingevuld wordt, wordt de bijhorende comforttoetsing niet uitgevoerd.

Twee inputwaarden voor de comfortberekening die ook onder advanced input vallen, zijn het gewicht van een enkele persoon en de dempingsverhouding van de brug. Verder worden hier nog de doorbuigingseis, de aslast van een dienstvoertuig, de geproduceerde toog en de vochtigheidsconditie gespecificeerd.

Advanced input			
Advanced input	Gewicht één persoon	P [N]	800.00
	Dichtheid voetgangersstroom (comforteis 1)		0.50 P/m <sup>2</sup> : dicht verkeer
	Minimale comfortklasse (comforteis 1)		CK3: minimaal comfort
	Dichtheid voetgangersstroom (comforteis 2)		
	Minimale comfortklasse (comforteis 2)		
	Dempingsverhouding	$\xi$ [-]	0.03
	Doorbuigingseis (verhouding lengte op doorbuiging)	$L/W_{\max}$ [-]	250
	Aslast dienstvoertuig	$Q_{svA}$ [kN]	25.00
	Geproduceerde constante toog	$R_{prod}$ [m]	200.00
	Vochtigheidsconditie		Wisselend droge en natte periodes

**Figuur 17: Advanced input - algemeen**

In een tweede deel van de advanced input worden de materialen van de verschillende elementen gekozen, zoals getoond in Figuur 18. Voor de vezels kan gekozen worden tussen enkele soorten koolstof- en glasvezels en moet de vezelvolumefractie bepaald worden. Voor de harsen bestaat de keuze uit epoxy, polyester of vinylester. De kern kan leeg gelaten worden of gevuld worden met PUR-schuim. Een standaard slijtlaag kan optioneel toegevoegd worden.

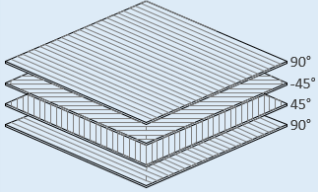
Advanced input				
Advanced input	Materialen	Materialen		
		Materiaal vezels	E-Glass	
		Materiaal hars	Polyester	
		Vezelvolumefractie	$V_f$ [%]	55.0
		Materiaal kern	PUR	
		Materiaal slijtlaag		Bitumenemulsie ingestrooid met split

**Figuur 18: Advanced input – materialen**

Het volgende onderdeel van de advanced input omvat de opbouw van de laminaten. Figuur 19 toont dit voor de lijfplaten ter illustratie. Hiervoor kan één van de courante opbouwen geselecteerd worden uit een keuzelijst. Alternatief kan de opbouw ook manueel ingevoerd worden. Daarbij is het belangrijk de juiste schrijfwijze te gebruiken voor subscripts en het  $\pm$ -symbool. Een voorbeeld hiervan is de opbouw "[0/-30/ $\pm$ 45<sub>2</sub>]<sub>2S</sub>", dat ingevoerd dient te worden als "[0/-30/+45\_2]\_2S". Wanneer gekozen wordt voor handmatige invoer, wordt dit voorbeeld weergegeven als hulpmiddel.

Voor elk van de opgegeven vezelrichtingen moet vervolgens ingegeven worden welk percentage van de totale dikte deze vezelrichting inneemt. Ten slotte wordt ook getoond of de laminaatopbouw speciale eigenschappen vertoont. Daarin wordt een onderscheid gemaakt tussen een symmetrisch laminaat, een gekruist laminaat, een hoeklaminaat, een gebalanceerd laminaat en een quasi-isotroop laminaat. De klassieke laminaattheorie waarop de berekening steunt, heeft als eis dat de opbouw gebalanceerd is. Wanneer dat niet het geval is, krijgt de gebruiker bijgevolg een waarschuwing dat de resultaten onbetrouwbaar kunnen worden, hoewel de berekening nog steeds uitgevoerd wordt.

Advanced input						
Advanced input	Lijfplaten	Lijfplaten				
		Opbouw		[90/-45/45/90]		
		Kenmerken		Gebalanceerd		
		Vezelrichting	$\theta$ [°]	90	-45	45
		Percentage van laminaatdikte	[%]	50	25	25
		Som percentages van laminaatdikte	[%]	100		
		Stijfheid langsrichting (overschrijven van berekende waarde)	$E_x$ [GPa]			
		Stijfheid dwarsrichting (overschrijven van berekende waarde)	$E_y$ [GPa]			
		Glijdingsmodulus (overschrijven van berekende waarde)	$G_{xy}$ [GPa]			
		Sterkte langsrichting (overschrijven van berekende waarde)	$f_{xt,RK}$ [MPa]			
Sterkte dwarsrichting (overschrijven van berekende waarde)	$f_{yt,RK}$ [MPa]					
Afsluifsterkte (overschrijven van berekende waarde)	$\tau_{xy,RK}$ [MPa]					



Figuur 19: Advanced input – laminaatopbouw

Tevens is het mogelijk de stijfheden en sterktes van een laminaat rechtstreeks in te geven wanneer deze bv. reeds gekend zijn uit testen. Indien de velden die hiervoor voorzien zijn ingevuld worden, worden de opgegeven waarden gebruikt in de verdere berekening in plaats van de resultaten van de bepaling volgens de klassieke laminaattheorie.

### 7.3.5 Output – algemeen

Het eerste deel van de uitgebreide output is weergegeven in Figuur 20 en bevat algemene resultaten, waaronder de totale en structurele massa van de brug en een inschatting van de kostprijs van de brug op basis van gekende richtprijzen per vierkante meter van een brugdek als functie van de massa per vierkante meter. Deze prijs wordt bepaald met inbegrip van de structurele elementen, de slijtlaag en het transport, waarbij gerekend wordt op een afstand van ca. 100 km die per vrachtwagen wordt afgelegd en waarbij geen bijzondere bereikbaarheidsrandvoorwaarden van toepassing zijn. Niet inbegrepen in de prijs zijn de leuning, montage en btw. Zodoende stelt dit de prijs voor van het brugdek zoals het op de site geleverd zou worden door een producent. De prijs van de leuning wordt niet meegenomen in de prijsbepaling omdat deze sterk kan variëren als functie van de esthetische wensen en dus tot een vertekend beeld van de prijs zou kunnen leiden.

Onder de term 'structureel' worden alle elementen begrepen met uitzondering van de slijtlaag en de leuning. Als laatste van het deel 'Algemeen' wordt nog de minimaal benodigde zeeg gegeven om de onmiddellijke doorbuiging door het eigengewicht te compenseren.

Algemeen			
Algemeen	Meest bepalende criterium in geval van optimalisatie		Geen optimalisatie
	Massa brug (structureel + slijtlaag + leuning)	$M_{brug,tot}$ [kg]	10862
	Massa brug (structureel)	$M_{brug,str}$ [kg]	8713
	Prijs van transport, structurele elementen en slijtlaag per vierkante meter	$P_{trans,str,slijt,m^2}$ [€/m <sup>2</sup> ]	873
	Prijs van transport, structurele elementen en slijtlaag	$P_{trans,str,slijt}$ [€]	61472
	Minimale totale geproduceerde zeeg	$Z_{tot}$ [mm]	108

Figuur 20: Output – Algemeen

### 7.3.6 Output – eigenfrequentie

De eerste controleberekening die aan bod komt betreft de eigenfrequentie. Deze wordt eens berekend in onbelaste toestand en eens onder een voetgangersstroom, zowel aan het begin als op het einde van de levensduur. Aangezien twee voetgangersstromen kunnen opgegeven worden, wordt voor beide gevallen een eigenfrequentie berekend. Het onderscheid tussen het begin en einde van de levensduur dat hierin gemaakt wordt, is een gevolg van de afnemende stijfheid in de loop der tijd. De belaste en onbelaste toestand aan het einde van de levensduur worden elk getoetst aan een eigen minimale waarde. Een voorbeeld van de resultaten is weergegeven in Figuur 21.

Eigenfrequentie				OK
Eigenfrequentie	Eigenfrequentie, onbelast, begin levensduur	$f_{0,onbel,kt}$ [Hz]	4.38	
	Eigenfrequentie onder voetgangersstroom, begin levensduur: comforteis 1	$f_{0,be,kt}$ [Hz]	3.93	
	Eigenfrequentie onder voetgangersstroom, begin levensduur (comforteis 2)	$f_{0,be,kt}$ [Hz]		
	Eigenfrequentie, onbelast, einde levensduur	$f_{0,onbel,it}$ [Hz]	3.94	
	Unity check: eigenfrequentie, onbelast, einde levensduur	$UC_{f0,onbel,it}$ [-]	0.76	OK
	Eigenfrequentie onder voetgangersstroom, einde levensduur (comforteis 1)	$f_{0,be,it}$ [Hz]	3.54	
	Eigenfrequentie onder voetgangersstroom, einde levensduur (comforteis 2)	$f_{0,be,it}$ [Hz]		
	Unity check: eigenfrequentie onder voetgangersstroom, einde levensduur (comforteis 1)	$UC_{f0,be,it}$ [-]	0.62	
Unity check: eigenfrequentie onder voetgangersstroom, einde levensduur (comforteis 2)	$UC_{f0,be,it}$ [-]		Geen eis	

Figuur 21: Output – eigenfrequentie

### 7.3.7 Output – doorbuiging

De doorbuiging wordt gecontroleerd onder een gelijkmatig verdeelde belasting en onder een dienstvoertuig. Omdat de afnemende stijfheid ook hier een rol speelt, wordt opnieuw een onderscheid gemaakt tussen doorbuiging aan het begin en op het einde van de levensduur. Daarvan worden enkel de waarden aan het einde van de levensduur getoetst aan de gestelde eis. Figuur 22 toont een voorbeeld.

Doorbuiging				OK
Doorbuiging	Doorbuiging door gelijkmatig verdeelde belasting, begin levensduur	$w_{BC3,kt}$ [mm]	46.23	
	Doorbuiging door gelijkmatig verdeelde belasting, einde levensduur	$w_{BC3,it}$ [mm]	57.07	
	Unity check: doorbuiging door gelijkmatig verdeelde belasting, einde levensduur	$UC_{wBC3,it}$ [-]	0.89	
	Doorbuiging door dienstvoertuig, begin levensduur	$w_{BC4,kt}$ [mm]	11.99	
	Doorbuiging door dienstvoertuig, einde levensduur	$w_{BC4,it}$ [mm]	14.80	
	Unity check: doorbuiging door dienstvoertuig, einde levensduur	$UC_{wBC4,it}$ [-]	0.23	

Figuur 22: Output – doorbuiging

### 7.3.8 Output – verticale versnelling

De laatste controle in de GGT betreft de verticale versnelling, die zoals reeds vermeld berekend wordt voor de twee opgelegde voetgangersdichtheden en getoetst wordt aan de vereiste comfortklassen die daaraan gekoppeld werden. De behaalde comfortklasse wordt eveneens meegegeven, zoals in Figuur 23.

Verticale versnelling			OK	
Verticale versnelling	Verticale ontwerpversnelling (comforteis 1)	$a_{d,vert}$ [m/s <sup>2</sup> ]	1.52	OK
	Unity check: verticale ontwerpversnelling (comforteis 1)	$u_{C_{ad,vert}}$ [-]	0.61	
	Behaalde comfortklasse verticale versnelling (comforteis 1)		CK3	
	Verticale ontwerpversnelling (comforteis 2)	$a_{d,vert}$ [m/s <sup>2</sup> ]		Geen eis
	Unity check: verticale ontwerpversnelling (comforteis 2)	$u_{C_{ad,vert}}$ [-]		
	Behaalde comfortklasse verticale versnelling (comforteis 2)			

Figuur 23: Output - verticale versnelling

### 7.3.9 Output – sterkte van de flenzen

In de UGT wordt naast de verdeelde belasting en het dienstvoertuig ook gekeken naar een onbedoeld voertuig, dat doorgaans meer belastend is dan het dienstvoertuig. In de rekentool worden in de UGT enkel toetsingen op laminaatniveau uitgevoerd. De CUR-aanbeveling laat deze manier van werken toe.

De boven- en onderflens zorgen voor het weerstandsbiedend moment en worden dus in druk- en trekspanning belast. De optredende spanningen worden getoetst aan de sterktes. De controles van beide flenzen worden weergegeven in Figuur 24.

Sterkte van de flenzen			OK
Spanning in bovenflens	$\sigma_{x,bf,M}$ [MPa]	51.85	OK
Unity check: spanning in bovenflens	$u_{C_{\sigma_x,bf}}$ [-]	0.16	
Spanning in onderflens	$\sigma_{x,of,M}$ [MPa]	51.85	OK
Unity check: spanning in onderflens	$u_{C_{\sigma_x,of}}$ [-]	0.14	

Figuur 24: Output - sterkte van de flenzen

### 7.3.10 Output – sterkte van de lijfplaten

De lijfplaten worden belast in schuifspanning en in drukspanning, waarvan de waarden vergeleken worden met de respectievelijke sterktes, zoals weergegeven in Figuur 25.

Sterkte van de lijfplaten			OK
Schuifspanning in lijfplaat	$\tau_{xy,lif,V}$ [MPa]	18.77	OK
Unity check: schuifspanning in lijfplaat	$u_{C_{\tau_{xy,lif}}}$ [-]	0.15	
Drukspanning in de lijfplaat	$\sigma_{y,lif,BCS}$ [MPa]	33.43	OK
Unity check: drukspanning in lijfplaat	$u_{C_{\sigma_{y,lif}}}$ [-]	0.10	

Figuur 25: Output - sterkte van de lijfplaten

## 7.4 Optimalisatie

Om niet manueel door middel van trial-and-error te moeten zoeken naar een ontwerp dat aan alle eisen voldoet, is de mogelijkheid voorzien een optimalisatie uit te voeren naar de hoogte van het brugdek, naar de laminaatdiktes of naar beide tegelijk. In Figuur 14 werd reeds aangegeven waar deze optimalisatie ingesteld kan worden onder de basic input.

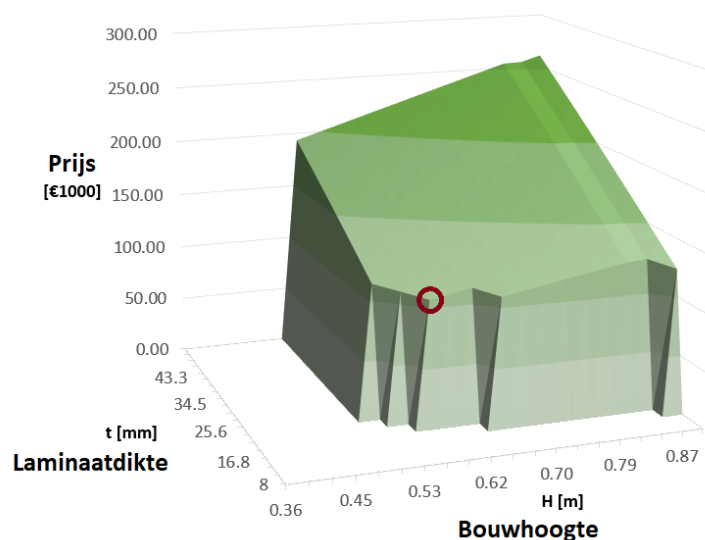
De optimalisatie bepaalt de kleinst mogelijke bouwhoogte of laminaatdikte waarvoor toch alle eisen voldaan zijn. Als gevolg worden de inputwaarden van de grootheden waarnaar geoptimaliseerd wordt niet meer gebruikt maar worden ze overschreven door de nieuw berekende waarden. Als gevolg van de optimalisatie zijn steeds alle eisen voldaan en wordt het meest bepalende criterium getoond. De unity check van dit criterium is bijgevolg gelijk aan 1.

In bepaalde gevallen is het mogelijk dat geen optimale bouwhoogte of laminaatdikte bepaald kan worden. Dit gebeurt wanneer onder de combinatie van opgegeven ontwerpparameters, eisen en belastingen geen enkele realistische waarde van de te optimaliseren grootheid volstaat om de brug aan alle eisen te laten voldoen. In zulke gevallen krijgt de gebruiker hiervan een melding.

Figuur 26 toont een voorbeeld van een plot van de kostprijs van een bepaalde brug in functie van de bouwhoogte en de laminaatdikte. De prijs stijgt zoals verwacht met zowel de bouwhoogte als de



laminaatdikte. De lijn waarlangs het oppervlak afgesneden wordt geeft aan vanaf waar niet alle eisen voldaan zijn. In geval van een optimalisatie naar beide parameters wordt dan het punt op het oppervlak bepaald waarvoor de prijs het laagst is. Dit punt is in de figuur aangeduid met een rode cirkel.



Figuur 26: Visualisatie van optimalisatie

## 8 UITWERKING VAN TWEE REPRESENTATIEVE CASES MET REKENTOOL

De bestaande fietsers- en voetgangersbruggen in Puurs en Mortsel worden in deze sectie berekend met de rekentool, om vervolgens de resultaten te vergelijken met de rekennota's die voor deze bruggen werden gemaakt in de ontwerpfase. Op basis daarvan kunnen conclusies getrokken worden over de mate waarin de eerste toetsing van de rekentool representatief is voor de uiteindelijke resultaten, en welke punten mogelijks verschillen veroorzaken. Er werd gekozen voor deze twee bruggen omdat op die manier zowel een eenvoudig opgelegde brug, in Puurs, als een dubbelzijdig ingeklemde brug, in Mortsel, aan bod komt.

### 8.1 Fietsostrate F18, Puurs

#### 8.1.1 Uitgevoerde controleberekeningen

In de GGT worden in de rekennota van de brug in Puurs de eigenfrequentie, doorbuigingen en de hellingen gecontroleerd. Elk van deze controles zit ook in de rekentool vervat. In de UGT behandelt de rekennota de sterkte van de flenzen, de lijfplaten, de leuningbevestiging, de zijflenzen, de ankers en het laminaat rond de ankers. Hiervan worden enkel de sterktes van de flenzen en de lijfplaten in de rekentool gecontroleerd. Daarnaast wordt in de rekennota ook rekening gehouden met het thermische gedrag van de brug en worden de reactiekrachten in de opleggingen bepaald, wat in de rekentool niet het geval is.

#### 8.1.2 Vergelijking resultaten

De belangrijkste grootheden van de berekening die zowel in de rekennota als de rekentool aan bod komen, zijn gegeven in de tweede en derde kolom van Tabel 26 respectievelijk. Waarden die sterk afwijken van de rekennota worden in het vet aangeduid. Wanneer er aanzienlijke verschillen zijn, worden deze vaak veroorzaakt doordat de rekennota gebruik maakt van waarden voor bepaalde

parameters die afwijken van de meest courante waarden en niet als input toegankelijk zijn in de rekentool. Om een representatieve vergelijking mogelijk te maken, wordt een tweede berekening met de rekentool uitgevoerd waarin zulke parameters afgestemd worden op de rekennota, hoewel dit voor de eindgebruiker van de rekentool niet mogelijk is. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in de vierde kolom van de tabel. Wanneer de verschillen grotendeels weggewerkt worden door deze aangepaste berekening, staat dit toe de oorzaken van de verschillen met de eerste berekening te identificeren.

Tabel 26: Vergelijking resultaten voor de fietsers- en voetgangersbrug in Puurs

Grootheid	Rekennota	Rekentool	Rekentool (aangepast)
Algemene kenmerken			
Totale massa, $M_{brug,tot}$ [kg]	8210	8221	8221
Eigengewicht, $q_{EG}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1,1	1,1	1,1
Buigstijfheid, $EI_x$ [MNm <sup>2</sup> ]	135	137	137
Afschuifstijfheid, $GA_{xy}$ [MN]	250	249	249
Controles GGT			
Eigenfrequentie, onbelast, $f_{0,onbel,it}$ [Hz]	3,4	<b>2,83</b>	3,3
Eigenfrequentie, belast, $f_{0,bel,it}$ [Hz]	2,9	<b>2,44</b>	2,9
Doorbuiging t.g.v. verdeelde belasting, $w_{BC3,it}$ [mm]	158	159	159
Doorbuiging t.g.v. dienstvoertuig, $w_{BC4,it}$ [mm]	38	39	39
Zeeg aan het begin van de levensduur, $Z_{tot}$ [mm]	139	138	138
Controles UGT			
Drukspanning in bovenflens, $\sigma_{x,bf,M}$ [MPa]	122	<b>81</b>	119
Trekspanning in onderflens, $\sigma_{x,of,M}$ [MPa]	122	<b>80</b>	117
Schuifspanning in lijfplaat, $\tau_{xy,lf,v}$ [MPa]	34	33	37
Drukspanning in lijfplaat, $\sigma_{y,lf,BC5}$ [MPa]	33	<b>40</b>	34

Vooreerst is een duidelijke afwijking van beide eigenfrequenties merkbaar. Dit is te wijten aan een correctiefactor van 1,18 waarmee de berekende eigenfrequentie wordt vermenigvuldigd waarvoor gesteund wordt op ervaring van de producent uit de praktijk.

Verder treden verschillen op in de trek- en drukspanningen in de flenzen en de lijfplaten. Deze zijn enerzijds te wijten aan verschillende waarden die gebruikt worden voor de belastingsfactoren in de UGT. De afwijkingen op de spanningen in de flenzen zijn anderzijds ook te wijten aan een reductiefactor  $f_{red,h}$ , die lokale onderbrekingen in de vezels in rekening brengt, een gevolg van de productietechniek van de brug in Puurs. In de rekentool wordt aangenomen dat dit niet het geval is, terwijl de rekennota hier wel van uitgaat. De drukspanning in de lijfplaten wordt daarnaast ook aanzienlijk beïnvloed door de waarde van de geconcentreerde belasting. In de rekennota wordt hiervoor een lagere waarde gebruikt dan aanbevolen door Eurocode 1.

## 8.2 Fietsostrade F11, Mortsel

### 8.2.1 Uitgevoerde controleberekeningen

De rekennota van de brug in Mortsel behandelt in de GGT de doorbuigingen, de eigenfrequentie en het comfort. De rekentool behandelt eveneens elk van deze criteria. In de UGT worden de sterktes van

alle laminaten, de reactiekrachten en de verbindingen aan de opleggingen en met de leuning gecontroleerd. Verder wordt ook geverifieerd dat er geen knik optreedt in de lijfplaten. In de rekentool worden enkel de sterktes van de flenzen en de lijfplaten gecontroleerd.

### 8.2.2 Vergelijking resultaten

Analoog aan de vergelijking van de resultaten van de brug in Puurs, worden in Tabel 27 enkele belangrijke grootheden opgelijst. Opnieuw worden in de laatste kolom enkele vaste parameters in de rekentool gewijzigd in functie van de waarden die in de rekennota gebruikt worden, om een betere vergelijking mogelijk te maken en uit te maken waar de verschillen veroorzaakt worden.

**Tabel 27: Vergelijking resultaten voor de fietsers- en voetgangersbrug in Mortsel**

Grootheid	Rekennota	Rekentool	Rekentool (aangepast)
Laminaateigenschappen			
Stijfheid langsrichting van flenzen, $E_x$ [GPa]	30,74	29,55	27,93
Stijfheid dwarsrichting van flenzen, $E_y$ [GPa]	14,08	13,23	14,16
Glijdingsmodulus van flenzen, $G_{xy}$ [GPa]	4,39	4,38	4,63
Stijfheid langsrichting van lijfplaten, $E_x$ [GPa]	15,74	17,86	15,24
Stijfheid dwarsrichting van lijfplaten, $E_y$ [GPa]	15,74	17,86	15,24
Glijdingsmodulus van lijfplaten, $G_{xy}$ [GPa]	5,69	6,67	5,69
Controles GGT			
Eigenfrequentie, onbelast, $f_{0,onbel,it}$ [Hz]	2,61	<b>3,37</b>	<b>3,28</b>
Doorbuiging t.g.v. eigengewicht, $w_{EG,it}$ [mm]	39,00	43,00	39,50
Doorbuiging t.g.v. verdeelde belasting, $w_{BC3,it}$ [mm]	21,10	<b>51,94</b>	19,45
Doorbuiging t.g.v. dienstvoertuig, $w_{BC4,it}$ [mm]	17,70	<b>10,89</b>	<b>11,65</b>

In de rekennota wordt de opbouw van elk van de laminaten in detail opgegeven, waaruit vervolgens de laminaateigenschappen bepaald worden aan de hand van de KLT. Gezien alle controles in belangrijke mate beïnvloed worden door deze eigenschappen, is een vergelijking ervan met de rekentool toepasselijk. De rekentool geeft in eerste instantie een behoorlijke benadering van de gerapporteerde waarden. Echter bevatten de laminaatopbouwen een sterk doorgedreven detaillering met verschillende vezelvolumefracties in verschillende lamellen van eenzelfde laminaat, terwijl in het 'Input – Output'-tabblad van de rekentool slechts één vezelvolumefractie voor de volledige brug kan ingegeven worden, waardoor er alsnog verschillen optreden. Wanneer de achterliggende berekening van de rekentool wordt aangepast om toch te steunen op de opgegeven gedetailleerde laminaatopbouwen, worden beter overeenstemmende resultaten verkregen, zoals merkbaar in de vierde kolom van de tabel. De kleine verschillen die nog aanwezig zijn, zijn vermoedelijk het gevolg van andere startwaarden voor de eigenschappen van de E-glasvezels en het polysterhars.

De controles in beide grenstoestanden werden in de rekennota uitgevoerd met eindige-elementensoftware. Een ondubbelzinnige vergelijking van de optredende spanningen met de rekentool is niet mogelijk omdat de rekennota werkt met omhullenden van de spanningen van verschillende belastingscombinaties, waardoor de aard van de spanningen moeilijk bepaald kan worden. Bovendien worden de hoogste spanningen omwille van het gebruik van de eindige-elementenmethode waargenomen in de verbindingen met de opleggingen onder de vorm van spanningsconcentraties, terwijl de rekentool enkel rekening houdt met nominale spanningen.

De eigenfrequentie in onbelaste toestand wordt eveneens uit de eindige-elementensoftware bepaald en wijkt aanzienlijk af van de berekende waarden uit de rekentool. Dit kan te wijten zijn aan de vereenvoudigde berekeningswijze, steunend op de balktheorie, die in de rekentool gehanteerd wordt.

De comfortanalyse wordt in de rekennota niet expliciet uitgewerkt omdat vastgesteld wordt dat de eigenfrequentie niet in het kritieke interval van 1,2 tot 2,3 Hz ligt, waarbuiten de analyse niet nodig geacht wordt. De rekentool laat de comfortberekening slechts achterwege wanneer de eigenfrequentie groter dan 4,6 Hz is en is in dit opzicht dus conservatiever. Echter wordt de beoogde comforteis uit de rekennota wel degelijk behaald volgens de rekentool.

De waarden voor de doorbuiging ten gevolge van het eigengewicht sluiten vrij nauw aan. De doorbuiging ten gevolge van de uniform verdeelde last wijkt echter significant af omwille van een verschil in de opgelegde last. In de rekentool wordt een waarde van 4,0 kN/m<sup>2</sup> berekend uit de lengte van de brug, waarals in de rekennota slechts een beperkte last van 1,4 kN/m<sup>2</sup> beschouwd wordt als frequente belasting in de GGT. Het vervangen van deze automatisch bepaalde waarde door de opgelegde last in de rekentool, leidt tot een betere overeenstemming. In de doorbuiging ten gevolge van een dienstvoertuig is eveneens een vrij groot verschil waarneembaar, hoewel de reden hiervoor niet meteen duidelijk is.

Ten slotte wordt nog opgemerkt dat in de eindige-elementenanalyse in de rekennota gerekend wordt met een eindige stijfheid van 50 ton/mm van de inklemmingen, terwijl in de rekentool perfecte inklemmingen verondersteld worden.

## 9 BOUWKUNDIGE REKENSOFTWARE

Naast de analytische uitwerking zoals in voorgaande secties beschreven voor de dimensionering van een glasvezelsversterkte kunststoffen (GGVK) brug, kan tevens gebruik gemaakt worden van rekensoftware. Hierbij wordt in de eerste plaats gedacht aan bouwkundige rekensoftware (i.e. Diamonds, SCIA Engineer, SOFISTIK) aangezien deze het courantst gebruikt wordt bij overheden, studiebureaus, producenten en aannemers voor het ontwerp van traditionele civieltechnische bouwkundige constructies. Indien meer gedetailleerde resultaten gewenst zijn, kan geopteerd worden voor een full-3D eindige-elementenbenadering (i.e. Abaqus, ANSYS). Echter is deze benadering voor een bouwkundig studiebureau onbetaalbaar en wordt ze in dit deel van de paper niet behandeld en wordt voornamelijk gefocust op veelgebruikte bouwkundige rekensoftware.

Belangrijke verschillen ten opzichte van structuren uit traditionele bouwmaterialen (i.e. gewapend beton en staal) die aandacht vereisen bij het modelleren van GGVK structuren zijn:

- Het sterk anisotroop karakter van het GGVK materiaal;
- De toetsingscriteria voor sterkte, die voor bouwkundige ingenieurs totaal onbekend zijn;
- Belangrijke dwarskrachtvervorming die typische balk- of plaalementen vertonen;
- Bepaalde faalmodi die voor een bouwkundig ingenieur totaal onbekend/onverwacht.

Het is belangrijk te noteren dat de basiseigenschappen van de sterkte en stijfheid van een laminaat, los van de totale opbouw van de brug(dek)structuur op zich, dienen berekend (i.e. met een composieten rekenprogramma aan de hand van de klassieke laminaattheorie zoals eLamX<sup>2</sup>) of ingeschat (i.e. met normen en richtlijnen zoals CUR96:2019) te worden.

In het vervolg van dit hoofdstuk zal een beschrijving gegeven worden van de mogelijkheid van gebruik van de opgenoemde veelgebruikte bouwkundige rekensoftware: Buildsoft Diamonds, Sofistik en Scia Engineer.

## 9.1 Buildsoft Diamonds

Buildsoft Diamonds is een bouwkundig rekenprogramma gericht op het ontwerp van draagconstructies uit de traditionele bouwmaterialen staal, gewapend beton en hout en beschikt hiervoor over de nodige ingebouwde normdocumenten. Echter is het niet mogelijk om een materiaal met orthotrope materiaaleigenschappen in te voeren in het programma. Daarnaast verwaarloost de software de invloed van de dwarskrachtvervormingen in de berekening van de doorbuiging, welke een groot deel uitmaken bij GVVK structuren. Om deze redenen is Buildsoft Diamonds niet geschikt voor het berekenen van GVVK draagconstructies en structuren.

## 9.2 SOFiSTiK

Sofistik is een veelgebruikt softwarepakket voor het ontwerp van GVVK constructies zoals windturbinebladen, maar wordt ook toegepast voor het ontwerp van bouwkundige civieltechnische (draag)constructies. In deze software is het mogelijk om de belangrijkste opgesomde aandachtspunten bij het ontwerp met GVVK materialen in rekening te brengen. Zo kunnen onafhankelijke sterkte- en stijfheidswaarden opgegeven worden voor de materiaaleigenschappen en wordt rekening gehouden met dwarskrachtvervormingen.

## 9.3 SCIA Engineer

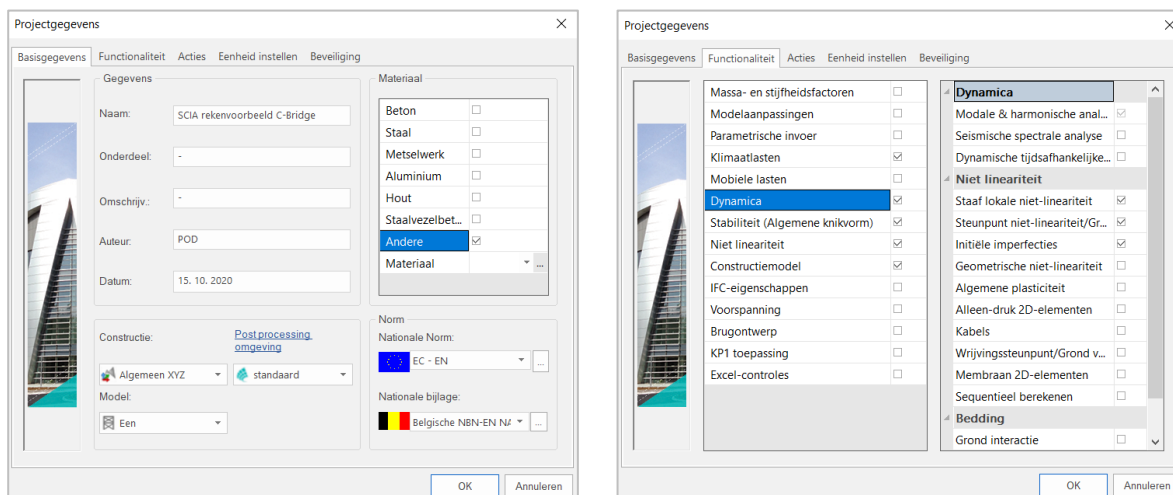
Gezien het veelvuldig gebruik van de software SCIA Engineer bij Belgische studiebureaus en overheden, dat bleek uit een rondvraag bij de gebruikersgroep van het TETRA onderzoeksproject C-Bridge, wordt in deze sectie in meer detail ingegaan op het gebruik van dit programma voor het dimensioneren en ontwerpen van GVVK constructies en meer bepaald het brugontwerp.

In de volgende subsecties wordt hetzelfde rekenvoorbeeld dat gebruikt werd bij de toelichting van de analytische rekenmethode uitgewerkt aan de hand van SCIA Engineer. Hier wordt stap-voor-stap beschreven hoe het ontwerp van een GVVK brug uitgevoerd kan worden door gebruik te maken van deze software. Er wordt gebruik gemaakt van een top-bottom aanpak volgens de boomstructuur aan de rechterkant van de SCIA Engineer interface. Er wordt gestart vanaf het aanmaken van een project en de invoer van de orthotrope materiaaleigenschappen van de GGVK, waarna de constructie opgebouwd wordt en de belastingen worden aangebracht. Als laatste worden de solverinstellingen besproken en komen de bekomen resultaten aan bod, waarbij ook de vergelijking met de analytische resultaten gemaakt wordt.

### 9.3.1 Project

Bij het aanmaken van een nieuw project zal onder de materialen andere worden aangeduid, zodat in een latere fase het composietmateriaal van de boven- en onderflens en de lijfplaten en zijranden gedefinieerd kan worden.

Tevens dient de module 'Dynamica' geactiveerd te worden zodat de eigenfrequenties van de constructie berekend kunnen worden. Deze kan teruggevonden worden onder het tabblad 'Functionaliteiten'.



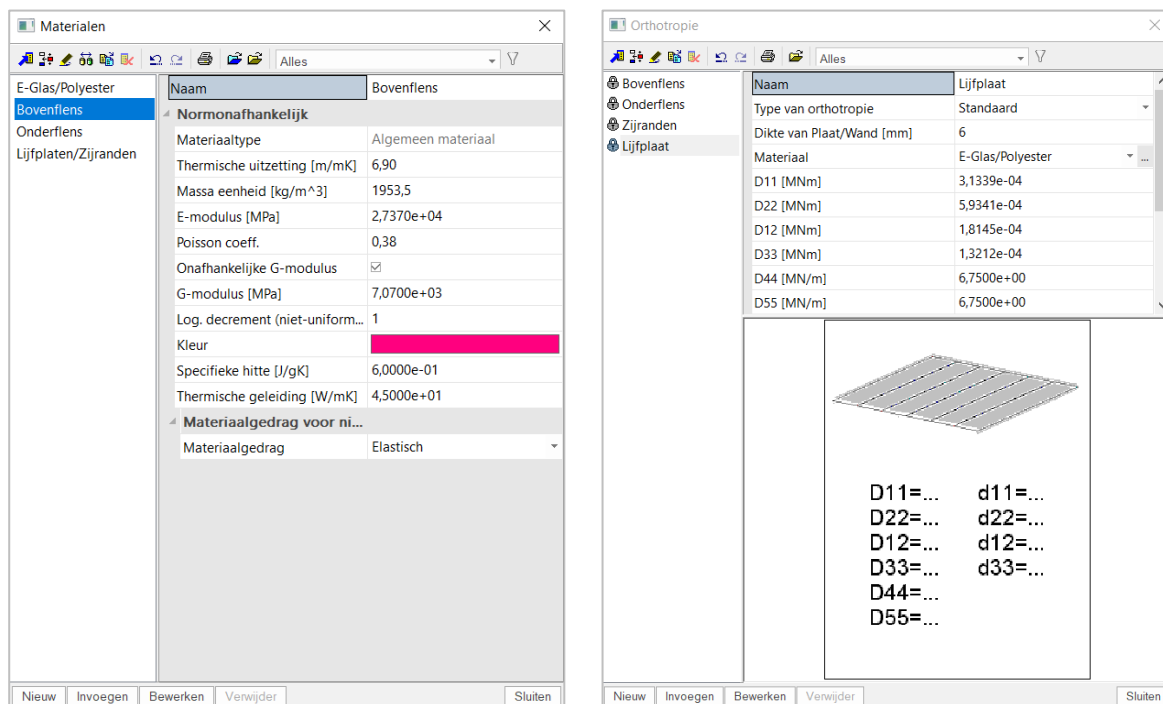
**Figuur 27: Projectgegevens**

### 9.3.2 Materiaal

Gezien de specifieke lagenopbouw van de verschillende onderdelen (boven- en onderflens, lijfplaten en zijranden) van het brugdek, zullen deze aanleiding geven tot andere stijfheidseigenschappen en Poisson-factoren. Per onderdeel dient een verschillend composietmateriaal vastgelegd te worden door in de menubalk 'Bibliotheken' te selecteren en vervolgens naar 'Materialen' te gaan, waarbij de velden bij 'Massa eenheid', 'E-modulus' en 'G-modulus' moeten aangepast worden. Hiervoor dient onafhankelijke G-modulus aangevinkt te worden. De laminaateigenschappen van de verschillende onderdelen kunnen teruggevonden worden in Tabel 28. Een voorbeeld wordt weergegeven links in Figuur 28.

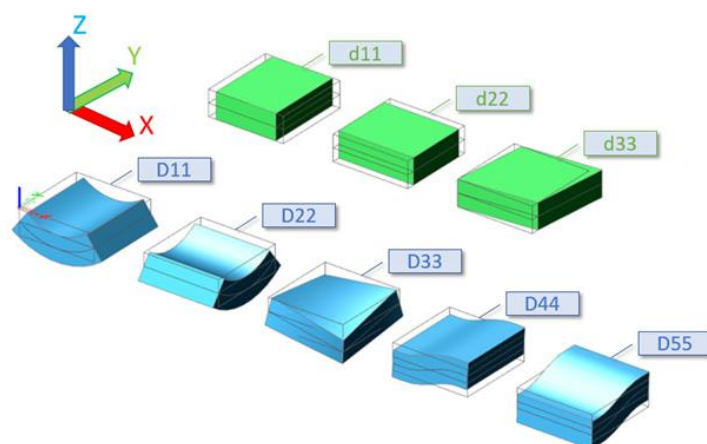
**Tabel 28: Laminaateigenschappen onderdelen brugdekstructuur**

Eig.	Bovenflens	Onderflens	Lijfplaten	Zijranden	Eenheid
t	14	14	6	25	mm
$\rho_c$	1953	1953	1953	1953	kg/m <sup>3</sup>
$E_x$	27370	30060	14450	14450	MPa
$E_y$	17000	16790	26950	26950	MPa
$\nu_{xy}$	0,380	0,350	0,257	0,257	-
$\nu_{yx}$	0,236	0,196	0,478	0,478	-
$G_{xy}$	7070	6290	7850	7850	MPa
$G_{xz}$	7070	6290	7850	7850	MPa
$G_{yz}$	7070	6290	7850	7850	MPa



**Figuur 28: Definiëring van de materialen en orthotrope eigenschappen van de verschillende onderdelen van het brugdek**

Bij de definiëring van de materialen van de verschillende onderdelen is het niet mogelijk om een verschillende stijfheidswaarde in te geven in de x- en y-richting van het laminaat. Hiervoor dient een orthotropie voor de verschillende onderdelen ingegeven te worden. Hiervoor kan het volgende pad gebruikt worden: 'Bibliotheken > Constructie, Berekening > Orthotropie'. In dit venster worden, op basis van het aangegeven materiaal en de opgegeven dikte van het element, de orthotrope eigenschappen in de vorm van D- en d-parameters automatisch berekend, zoals weergegeven rechts in Figuur 28. De parameters die met "D" beginnen, vertegenwoordigen plaatstijfheden, terwijl de parameters die met "d" beginnen, de membraanstijfheden zijn. De richting is afgeleid van de richting van het lokale coördinatensysteem. In wat volgt worden de verschillende stijfheden besproken en kan de bijhorende vervorming van het vlak teruggevonden worden in Figuur 29.



**Figuur 29: Vervormingspatroon D- en d-parameters orthotropie**

In de automatische berekening van de D- en d-parameters wordt nog steeds geen rekening gehouden met de afwijkende stijfheid in de dwarse richting, zoals aanvankelijk gezien kan worden aan de gelijke D<sub>11</sub>- en D<sub>22</sub>-parameters. De berekende waarden van de D- en d-parameters dienen overschreven te

worden door gebruik te maken van de in Tabel 28 opgegeven laminaateigenschappen en de onderstaande formules. De formules geven de berekening van de plaatstijfheid en de membraanstijfheid voor respectievelijk een vloerelement en een wandelement. De grootheden  $\nu_{xy}$  en  $\nu_{yx}$  van de laminaten in Tabel 28, die nog niet aan bod kwamen in de analytische berekening, werden bepaald met het programma eLamX<sup>2</sup>.

<b>Plaatstijfheid (vloerelement)</b>	
Buigstijfheid in de x-richting	$D_{11} = \frac{E_x \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}$
Buigstijfheid in de y-richting	$D_{22} = \frac{E_y \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}$
Gemengde stijfheid van $D_{11}$ en $D_{22}$ (transversale contractie)	$D_{12} = D_{21} = \nu_{yx} \cdot D_{11} = \nu_{xy} \cdot D_{22}$
Torsiestijfheid	$D_{33} = \frac{G_{xy} \cdot t^3}{12}$
Afschuifstijfheid in de x-richting	$D_{44} = \frac{G_{xz} \cdot t}{1,2}$
Afschuifstijfheid in de y-richting	$D_{55} = \frac{G_{yz} \cdot t}{1,2}$
<b>Membraanstijfheid (wandelement)</b>	
Normale membraanstijfheid in de x-richting (uitrekken)	$d_{11} = \frac{E_x \cdot t}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}}$
Normale membraanstijfheid in de y-richting	$d_{22} = \frac{E_y \cdot t}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}}$
Gemengde stijfheid van $d_{11}$ en $d_{22}$ (transversale contractie)	$d_{12} = d_{21} = \nu_{21} \cdot d_{11} = \nu_{12} \cdot d_{22}$
Afschuif membraanstijfheid	$d_{33} = G_{xy} \cdot t$

De resultaten van de uitwerking van de bovenstaande formules voor de opgegeven laminaatopbouw van de verschillende onderdelen van het brugdek uit het rekenvoorbeeld worden in Tabel 29 weergegeven.

Tabel 29: Berekende plaat- en membraanstijfheden voor de brugonderdelen

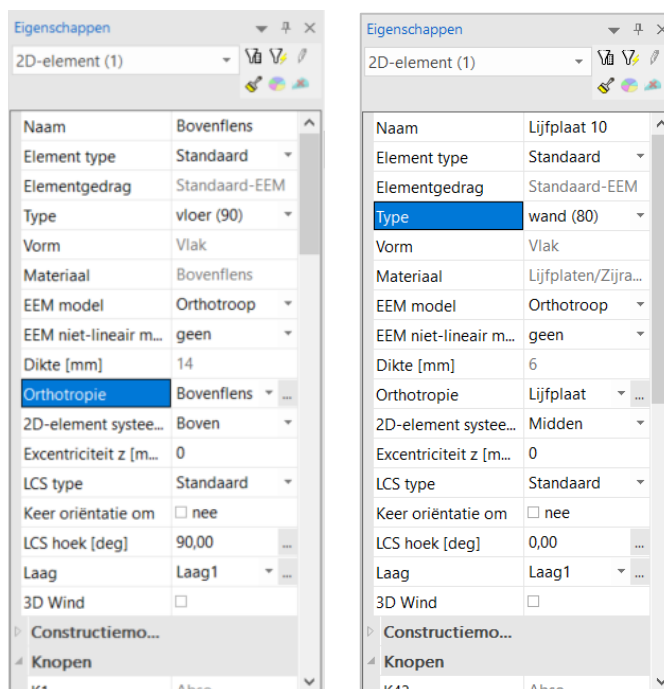
Fig.	Bovenflens	Onderflens	Lijfplaten	Zijranden	Eenheid
<i>Plaatstijfheden</i>					
D <sub>11</sub>	6,8752E-03	7,3800E-03	2,9653E-04	2,1450E-02	MNm
D <sub>22</sub>	4,2703E-03	4,1221E-03	5,5304E-04	4,0006E-02	MNm
D <sub>12</sub>	1,6225E-03	1,4465E-03	1,4174E-04	1,0253E-02	MNm
D <sub>21</sub>	1,6227E-03	1,4427E-03	1,4213E-04	1,0281E-02	MNm
D <sub>33</sub>	1,6167E-03	1,4383E-03	1,4130E-04	1,0221E-02	MNm
D <sub>44</sub>	8,2483E+01	7,3383E+01	3,9250E+01	1,6354E+02	MN/m
D <sub>55</sub>	8,2483E+01	7,3383E+01	3,9250E+01	1,6354E+02	MN/m
<i>Membraanstijfheden</i>					
d <sub>11</sub>	4,2093E+02	4,5184E+02	9,8842E+01	4,1184E+02	MN/m
d <sub>22</sub>	2,6145E+02	2,5237E+02	1,8435E+02	7,6811E+02	MN/m
d <sub>12</sub>	9,9339E+01	8,8560E+01	4,7247E+01	1,9686E+02	MN/m
d <sub>33</sub>	9,8980E+01	8,8060E+01	4,7100E+01	1,9625E+02	MN/m



### 9.3.3 Constructie

Bij het aanmaken van de verschillende onderdelen van de constructie (boven- en onderflens, lijfplaten, zijranden) is het belangrijk om in de eigenschappen het veld 'EEM model' aan te passen naar 'Orthotroop' en vervolgens in het veld 'Orthotropie' de reeds aangemaakte orthotropie van het onderdeel te selecteren. Merk op dat de dikte van het desbetreffende element steeds vastligt aan de hand van de gekozen orthotropie. Per dikte dient dus een nieuwe orthotropie aangemaakt te worden terwijl per opbouw van het laminaat een ander materiaal en orthotropie dient aangemaakt te worden.

De boven- en onderflens van het brugdek zullen aan de hand van vloerelementen opgebouwd worden terwijl de lijfplaten en de zijranden uit wandelementen bestaan. Als alternatief is het ook mogelijk om de volledige constructie uit schaalementen op te bouwen. De voorgaande stappen worden weergegeven in Figuur 30.



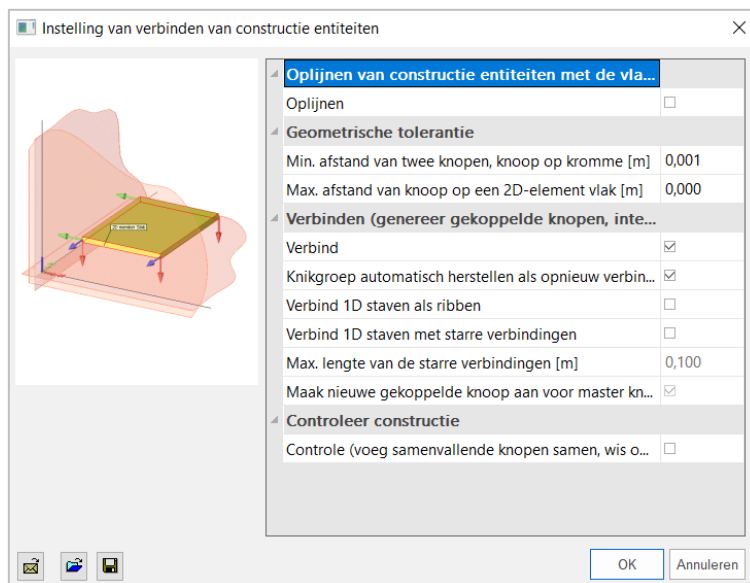
**Figuur 30: Eigenschappen van 2D vloer- en wandelement**

Daarnaast is het ook belangrijk dat de positie van het '2D-element systeemvlak' correct gekozen wordt, zodat juiste hart-op-hartafstanden worden bekomen tussen de verschillende onderdelen. Voor de wandelementen (lijfplaten en zijranden) wordt geopteerd voor een systeemvlak in het midden van het element, terwijl voor de boven- en onderflens respectievelijk gekozen moet worden voor een systeemvlak aan de bovenkant en onderkant. Hierdoor komt de afstand tussen de bovenkant van de bovenflens en de onderkant van de onderflens overeen met de constructiehoogte van het brugdek.

Als laatste dient ook aandacht geschonken te worden aan de richting van het lokale assenstelsel van de verschillende onderdelen. Het lokale assenstelsel van de boven- en onderflens, de lijfplaten en zijranden dient zodanig gepositioneerd te worden dat de x-richting evenwijdig ligt met de draagrichting van de brug. Het weergeven van de lokale assenstelsels kan via de beeldparameters. De oriëntatie van de verschillende onderdelen kan aangepast worden in het eigenschappenvenster van het element door het ingeven van een waarde in het veld 'LCS hoek'.

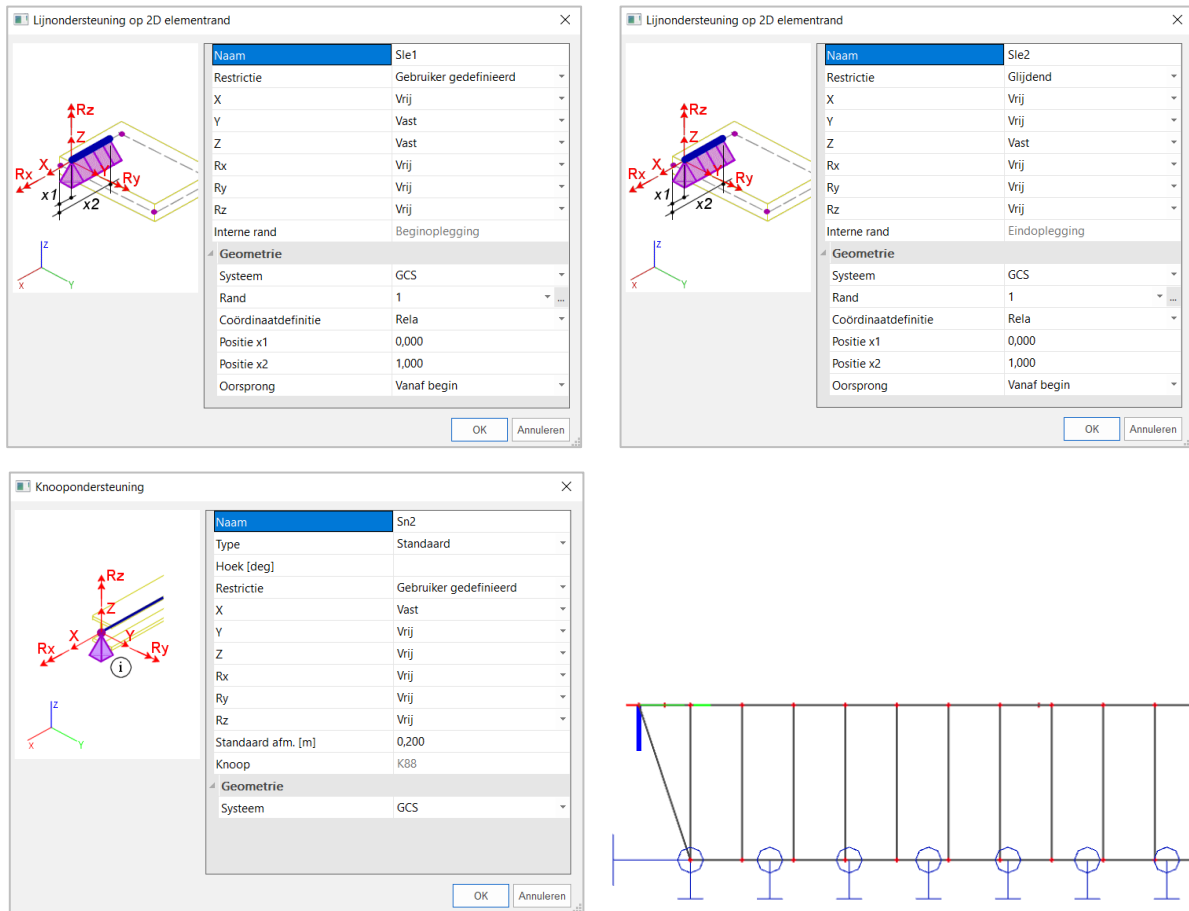
Eenmaal alle onderdelen van de brugdekconstructie uitgetekend zijn, kunnen deze onderling met elkaar verbonden worden om één samenwerkend structureel geheel te vormen. Hiervoor kan gebruik

gemaakt worden van de functie 'Constructie-entiteiten verbinden' in de boomstructuur, waarvan in Figuur 31 een voorbeeld wordt getoond.



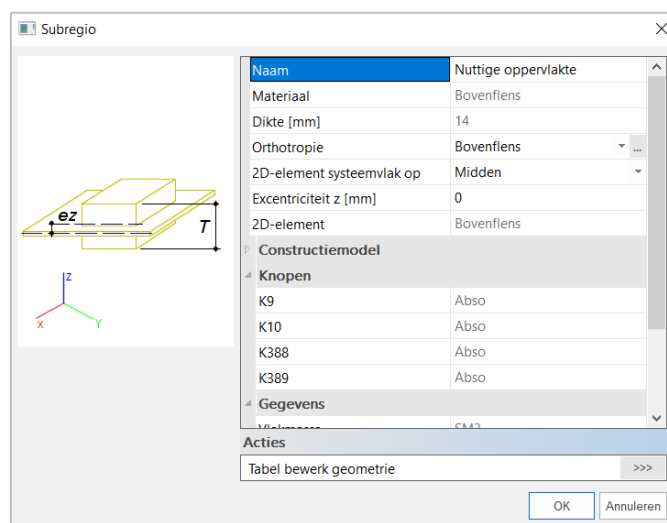
**Figuur 31: Verbinden van de verschillende constructie-entiteiten**

Voor dit rekenvoorbeeld wordt gebruik gemaakt van eenvoudig opgelegde randvoorwaarden. Langs de ene zijde van het brugdek wordt geopteerd voor een lijnondersteuning die de verplaatsing in de Y- en Z-richting verhindert en waarbij geen momenten worden opgenomen door de steunpunten. Langs de andere zijde van het brugdek wordt gekozen voor een lijnondersteuning die eveneens geen momenten opneemt en die enkel de verplaatsing in de Z-richting verhindert. Om tot statisch bepaalde randvoorwaarden te komen, worden als laatste twee knopondersteuning, die de verplaatsing in de X-richting verhinderen, aangebracht in één van de knopen van de beide lijnondersteuning. De volledige uitwerking en het uiteindelijke resultaat van de lijn- en knoondersteuning wordt weergegeven in Figuur 32.



**Figuur 32: Definiëring lijn- en knoopondersteuning voor de randvoorwaarden**

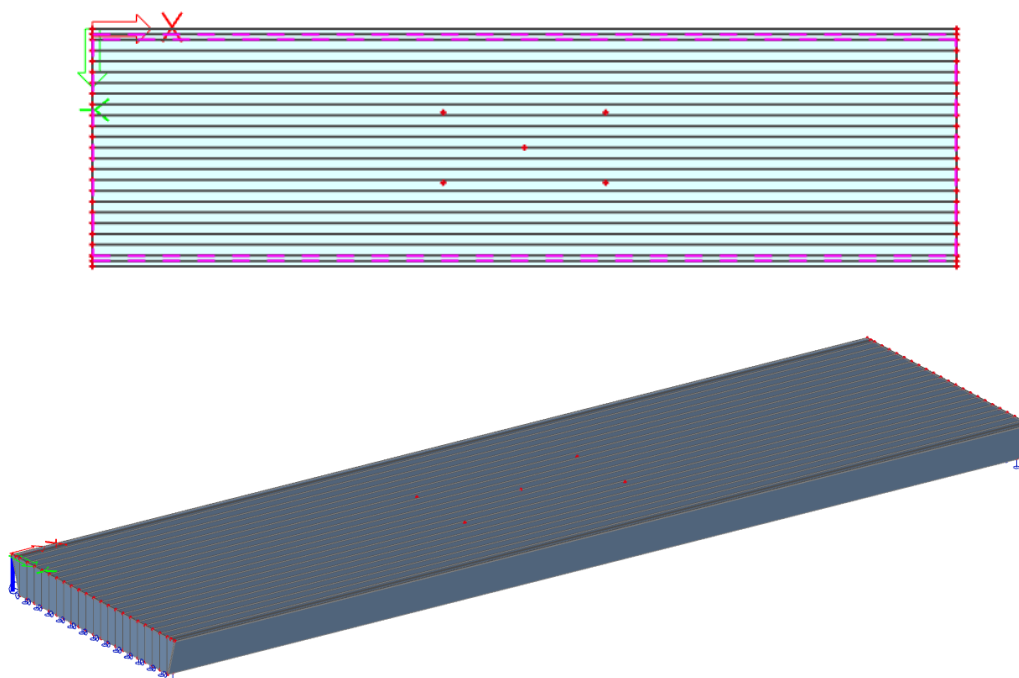
Voor het aanbrengen van de belastingen in een volgende stap worden verschillende 2D-elementonderdelen gedefinieerd op de bovenflens van het brugdek. Ten eerste wordt de nuttige oppervlakte op de bovenflens onderscheden aan de hand van een subregio met dezelfde eigenschappen als de bovenflens, zoals weergegeven in Figuur 33.



**Figuur 33: Vastleggen van subregio voor de nuttige oppervlakte op de bovenflens**

Vervolgens wordt de belasting van de leuning teruggebracht tot een lijnbelasting langs de rand van het brugdek door het vastleggen van twee interne randen langs beide zijden. Als laatste zullen de plaatsing

van de geconcentreerde belasting en de wiellasten van het dienst- en onbedoeld voertuig aangebracht worden aan de hand van interne knopen op de bovenflens. Het resultaat van de verschillende 2D-elementonderdelen wordt in onderstaande figuur weergegeven.



**Figuur 34:** Uiteindelijke constructie met aanduiding van 2D-elementonderdelen

#### 9.3.4 Belasting

Onder de belastingsgevallen zullen de in het analytische voorbeeld aangehaalde belastingen vastgelegd worden, namelijk:

- Het automatisch gegenereerde eigengewicht van de constructie;
- De geconcentreerde belasting van 10 kN (puntlast in knoop);
- De uniform verdeelde belasting volgens de formule uit EC1991-2 (vlaklast op 2D-element);
- Het dienstvoertuig met aslasten van 25 kN, een wielbasis van 3 m en een spoorbreedte van 1,3 m (puntlast in knoop);
- Een onbedoeld voertuig met aslasten van 80 kN en 40 kN, een wielbasis van 3 m en een spoorbreedte van 1,3 m (puntlast in knoop);
- Een voetgangersstroom zoals bepaald in het JRC-document. In dit geval wordt gewerkt met een voetgangersdichtheid van  $0,5 \text{ P/m}^2$  en een gewicht van één voetganger van 80 kg. (vlaklast op 2Delement).

Naast de lasten die in de analytische benadering worden gedefinieerd, zoals de uniform verdeelde belasting, de geconcentreerde belasting, het dienst- en onbedoeld voertuig en de voetgangersstroom, dienen ook de lijnlast ten gevolge van de leuning en de verdeelde belasting ten gevolge van de slijtlaag en de schuimkernen over respectievelijk de nuttige oppervlakte en de totale oppervlakte van het brugdek toegevoegd te worden. Aangezien deze laatste als belastingen worden ingegeven in het rekenmodel, zullen deze geen structurele bijdrage vormen in de buigstijfheid van het brugdek, zoals ook aangenomen werd in de analytische berekening.

De berekening van de uniform verdeelde belasting ten gevolge van het gewicht van de schuimblokken wordt in Tabel 30 weergegeven. Hierbij wordt gebruik gemaakt van dimensionele en materiële gegevens vastgelegd in het analytische rekenvoorbeeld.

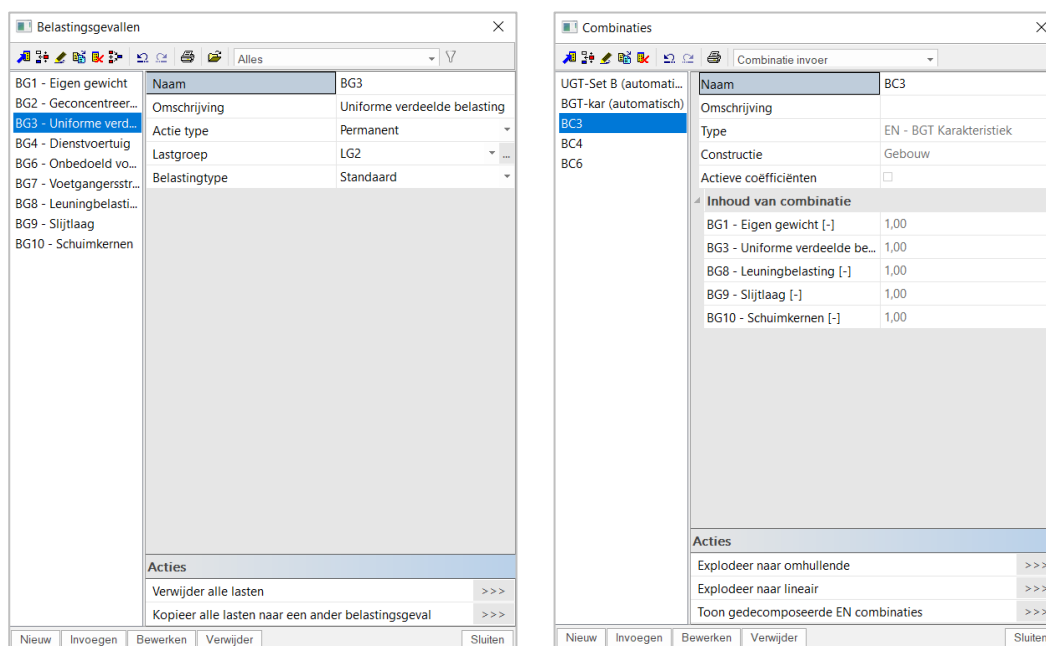
Tabel 30: Berekening belasting t.g.v. schuimkern

Beschrijving	Waarde	Eenheid
Breedte	$200 \cdot 6 = 194$	mm
Hoogte	$600 - 2 \cdot 14 = 572$	mm
Lengte	$16000 - 2 \cdot 25 = 15950$	mm
Volume	1,77	m <sup>3</sup>
Densiteit	50	kg/m <sup>3</sup>
Massa 1 schuimkern	88,50	kg
Aantal schuimkernen	21	-
Totale massa schuimkernen	1858,44	kg
Totale gewicht schuimkernen	18,23	kN
Verdeelde belasting	0,26	kN/m <sup>2</sup>

De uitwerking van de verdeelde belasting van de slijtlaag over de nuttige oppervlakte wordt hieronder weergegeven.

Tabel 31: Berekening belasting t.g.v. slijtlaag

Beschrijving	Waarde	Eenheid
Densiteit	1700	kg/m <sup>3</sup>
Dikte slijtlaag	15	mm
Verdeelde belasting	0,25	kN/m <sup>2</sup>



Figuur 35: Belastingsgevallen en –combinaties in SCIA Engineer

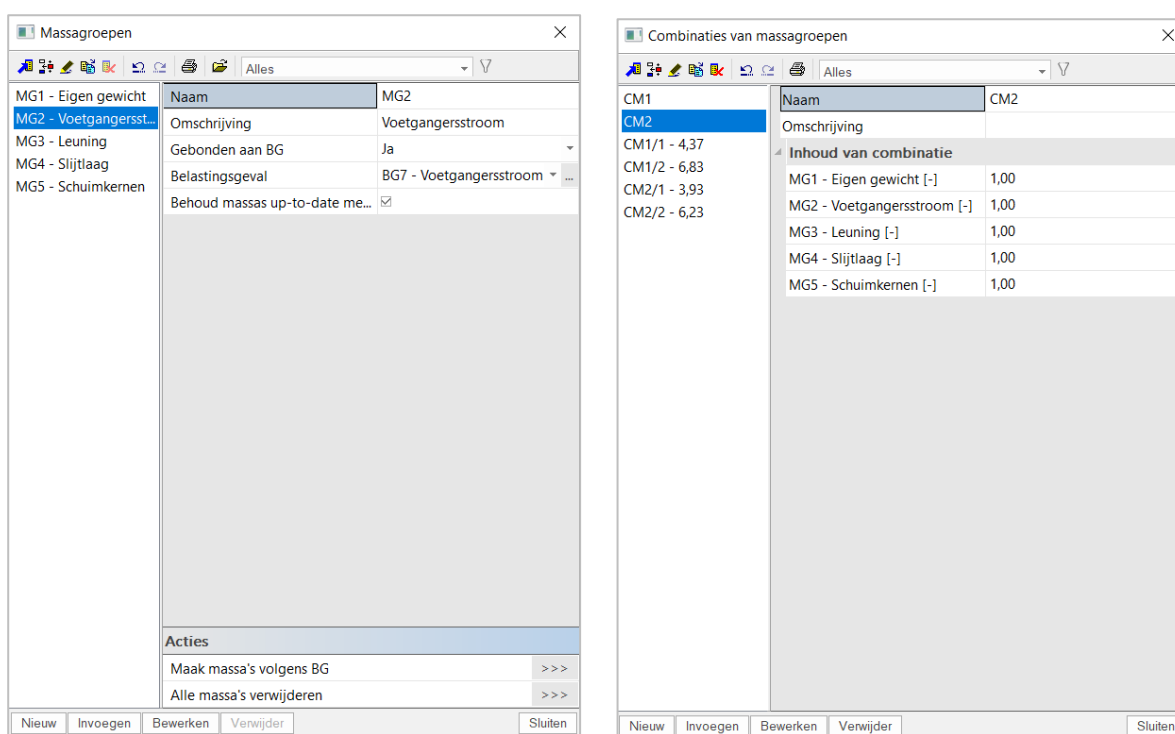
Enmaal de belastingsgevallen ingegeven zijn, kunnen de verschillende belastingscombinaties zoals in de vorige secties in het analytische voorbeeld aangegeven, aangemaakt worden. Dit wordt weergegeven in Figuur 35.

- BC3: Vaste lasten (eigengewicht en gewicht van slijtlaag, schuimblokken en leuning) en uniform verdeelde belasting;

- BC4: Vaste lasten (eigengewicht en gewicht van slijtlaag, schuimblokken en leuning) en dienstvoertuig;
- BC6: Vaste lasten (eigengewicht en gewicht van slijtlaag, schuimblokken en leuning) en onbedoeld voertuig.

### 9.3.5 Dynamica

De berekening van de eigenfrequentie dient volgens CUR96:2019 uitgevoerd te worden in onbelaste en belaste toestand met de aanwezige voetgangersstroom. In SCIA Engineer dienen twee massagroepen aangemaakt te worden om dit te bewerkstelligen. In de eerste plaats wordt het eigengewicht van de brug in beschouwing genomen. Deze massagroep wordt automatisch gegenereerd. In de tweede plaats worden de massa's van de voetgangersstroom van 0,5 P/m<sup>2</sup>, de leuning, de slijtlaag en de schuimblokken gedefinieerd. Hierbij is de massa van deze laatste massagroepen gebonden aan het desbetreffende belastingsgeval en zal een aanpassing aan de belasting tevens een verandering in de massa's teweegbrengen. De vensters waarin dit gebeurt in SCIA Engineer worden weergegeven in Figuur 36.

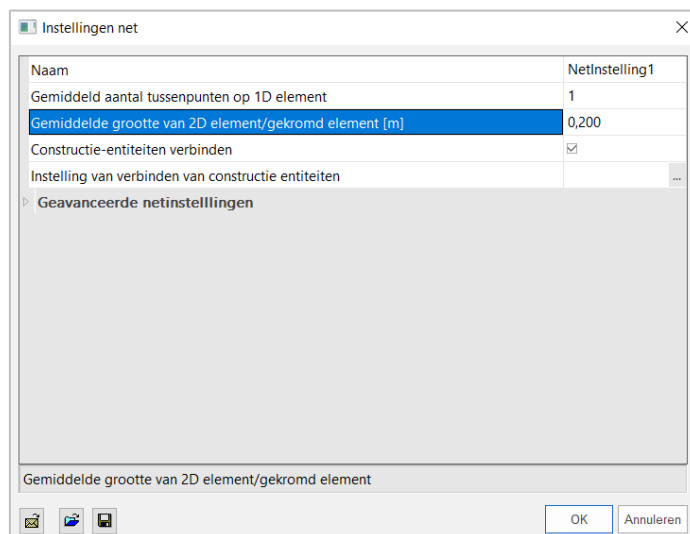


**Figuur 36: Massagroepen en -combinaties in SCIA Engineer**

Op dezelfde manier als bij de belastingscombinaties moeten ook massacombinaties aangemaakt worden voor het berekenen van de eigenfrequentie in onbelaste toestand (met enkel het eigengewicht en de vaste belastingen) en belaste toestand (met de voetgangersbelasting van 0,5 P/m<sup>2</sup>).

### 9.3.6 Instellingen net

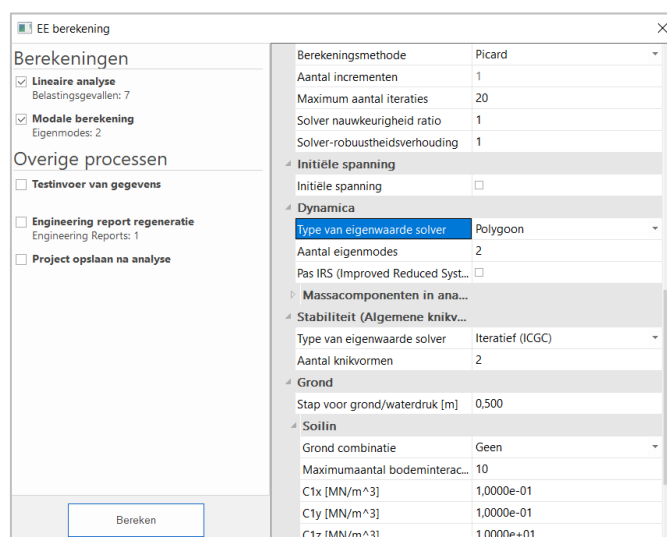
Als laatste stap voor de uiteindelijke uitvoering van de berekeningen dient de gemiddelde grootte van een element van het net verfijnd te worden. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de functie 'Instellingen net' in de boomstructuur links, of via de takenbalk via 'Instellingen > Net'. Standaard staat de gemiddelde grootte van de 2D-elementen in het net op 1 m. Voor gedetailleerdere resultaten kan deze best aangepast worden naar een elementgrootte van 0,2 m, zoals ook gezien kan worden in Figuur 37.



**Figuur 37: Netverfijning voor 2D-elementen in SCIA Engineer**

### 9.3.7 Berekening

Als laatste stap dient in de EE-berekening aangeduid te worden welke berekeningen uitgevoerd dienen te worden, zoals weergegeven in Figuur 38. Indien in het project de functionaliteit 'Dynamica' is aangeduid, kan in dit venster aan de linkerzijde enerzijds gekozen worden voor een lineaire berekening van de vervormingen en spanningen en anderzijds voor een modale berekening van de eigenfrequenties van de brug. Aan de rechterzijde van het venster kan onder het onderdeel 'Geavanceerde Solverinstellingen > Dynamica' aangeduid worden welk type solver toegepast dient te worden voor de bepaling van de eigenfrequenties en hoeveel eigenmodi berekend dienen te worden. Gezien de hogere orde eigenmodi niet van toepassing zijn ter controle van het comfort van het brugdek, worden enkel de eerste twee eigenmodi van het brugdek berekend voor de twee combinaties van massagroepen (onbelast en belast brugdek).



**Figuur 38: Berekeningsinstellingen in SCIA Engineer**

### 9.3.8 Resultaten

In deze sectie worden de belangrijkste resultaten zoals deze ook worden weergegeven in de analytische benadering en de rekentool opgenomen. Als eerste wordt de massa van de structuur berekend aan de hand van de resultaten uit SCIA Engineer. Vervolgens worden de GGT controles van de doorbuiging en

eigenfrequentie uitgevoerd waarna als laatste de UGT controles van de spanningen in de flenzen worden weergegeven.

### 9.3.8.1 Massa structuur

Aan de hand van de functie 'Resultante van reacties' kan in het resultatenvenster het eigengewicht van de constructie gevonden worden, waarmee de totale massa van de structuur berekend kan worden. Tabel 32 geeft het resultaat van de resultante van de reacties van het eigengewicht, de schuimblokken, de slijtlaag en de leuning.

Tabel 32: Berekening eigengewicht

Beschrijving	Waarde	Eenheid
Gewicht GVVK brugdek	71,35	kN
Gewicht schuimkern	18,30	kN
Gewicht brugdekstructuur	89,65	kN
<i>Massa brugdekstructuur</i>	<i>9139</i>	<i>kg</i>
Gewicht slijtlaag	16,00	kN
Gewicht leuning	3,52	kN
Totaal gewicht brugdek	109,17	kN
<i>Totale massa brugdek</i>	<i>11128</i>	<i>kg</i>

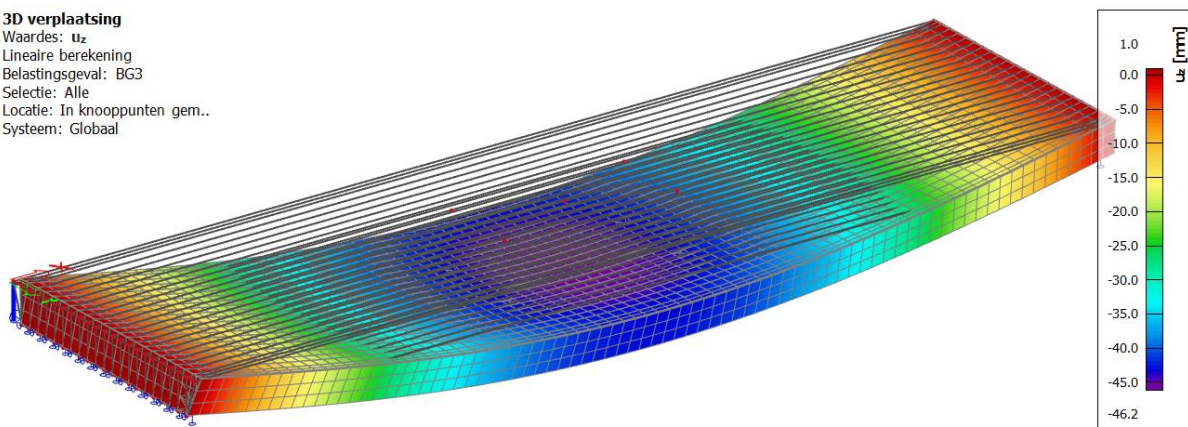
De massa van de brugdekstructuur is hiermee 4,9% groter dan de 8713 kg berekend in de analytische benadering. Dit verschil in massa is voornamelijk te wijten aan de dikker uitgevoerde eindranden in het SCIA Engineer model en het gebruik van 21 in plaats van 20 lijfplaten in de analytische benadering.

### 9.3.8.2 Doorbuiging

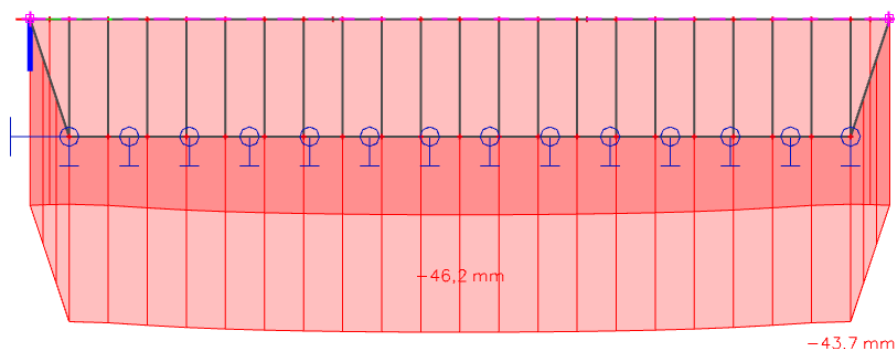
Figuur 39, Figuur 40 en Figuur 41 geven de doorbuiging onder de uniform verdeelde belasting, het dienstvoertuig en het onbedoeld voertuig respectievelijk. De doorbuigingseis bedraagt  $L/250$  wat neerkomt op een toelaatbare doorbuiging van 64 mm voor de brugdekstructuur.

In het eerste geval wordt de doorbuiging onder een uniform verdeelde belasting van  $4,61 \text{ kN/m}^2$  weergegeven. Doorbuiging in het midden van de centerlijn van het brugdek bedraagt 46,2 mm. Echter kan opgemerkt worden dat er zich een kleinere doorbuiging voordoet langs de zijranden van het brugdek. Zo bedraagt de doorbuiging in het midden van één van de randen van het brugdek 43,7 mm, wat ook afgeleid kan worden uit de doorbuiging op de dwarsdoorsnede. Hierin kan het orthotrope karakter van het GVVK materiaal waargenomen worden. Afhankelijk van de opbouw van de laminaten en de stijfheid in de dwarsrichting, vermindert dit verschil in doorbuiging tussen de rand en het midden van het brugdek.

3D verplaatsing  
 Waardes:  $u_z$   
 Lineaire berekening  
 Belastingsgeval: BG3  
 Selectie: Alle  
 Locatie: In knooppunten gem..  
 Systeem: Globaal





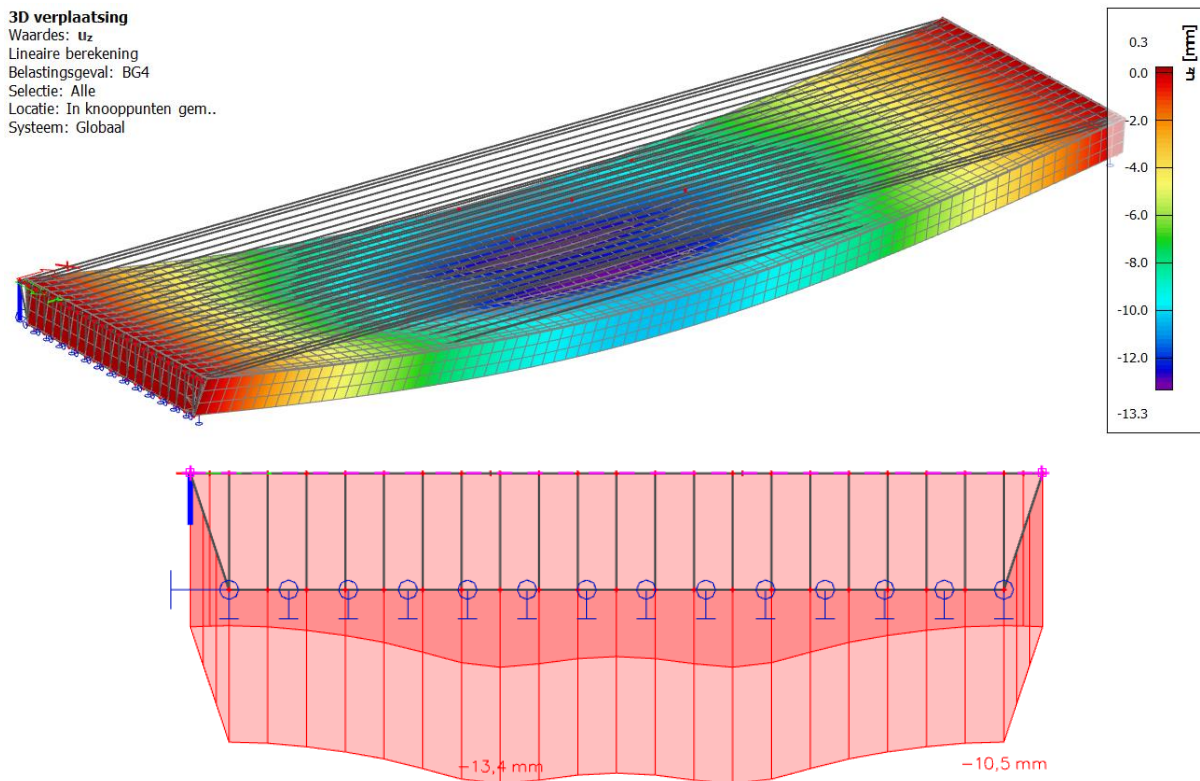


**Figuur 39: 3D-weergave en dwarsdoorsnede van de doorbuiging onder uniform verdeelde belasting**

Ter vergelijking bedraagt de analytisch berekende doorbuiging 57,07 mm en 46,23 mm respectievelijk met en zonder conversiefactoren die rekening houden met de omgevingsfactoren en de ouderdom. Aangezien in de berekening van de doorbuiging door SCIA Engineer geen rekening wordt gehouden met deze effecten dient er vergeleken te worden met de analytische benadering zonder conversiefactoren. Er kan geconcludeerd worden dat de analytisch benaderde doorbuiging in het midden van de doorsnede perfect overeenkomt met de doorbuiging berekend door SCIA Engineer. Er is een afname van 5,41% in doorbuiging tussen het midden van de centerlijn en de rand van het brugdek ten gevolge van de orthotropie van het materiaal. De doorbuiging is bijgevolg nog steeds lager dan de toelaatbare doorbuiging met een unity check van 0,68.

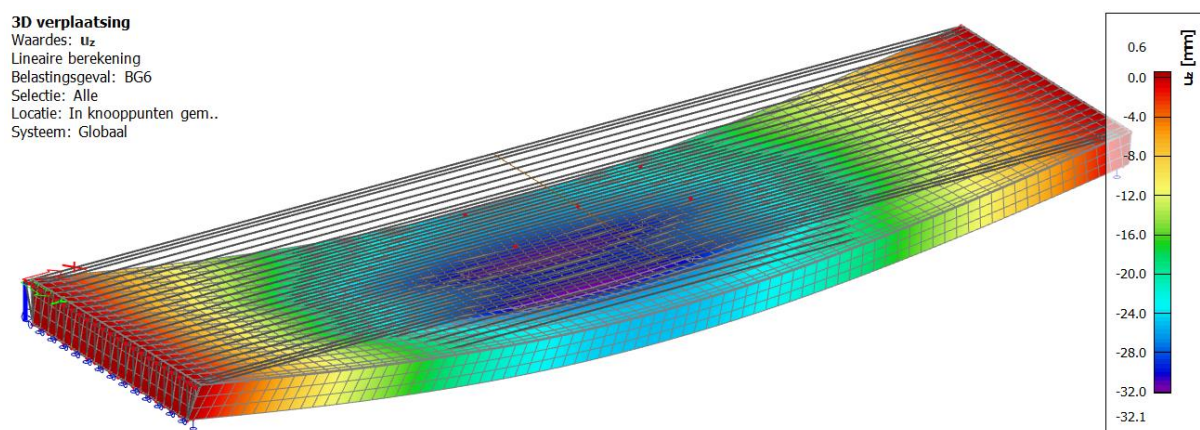
De doorbuiging in het midden van de centerlijn en aan de rand van het brugdek ten gevolge van het dienstvoertuig bedragen respectievelijk 12,6 mm en 10,5 mm en worden in Figuur 40 weergegeven. Echter treedt de maximale doorbuiging van het brugdek in de dwarsdoorsnede op ter plaatse van de wiellasten van het dienstvoertuig, waar de doorbuiging toeneemt tot 13,4 mm. Aan de hand van de doorbuiging in de dwarsdoorsnede van het brugdek, kan opnieuw het orthotrope karakter van het GVKK materiaal vastgesteld worden.

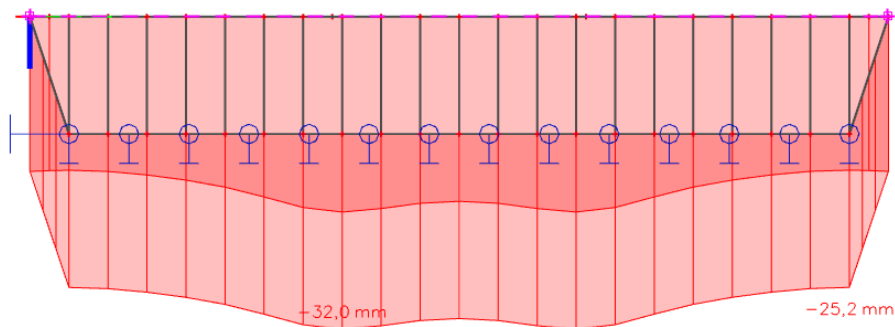
Ter vergelijking bedraagt de analytisch berekende doorbuiging onder het dienstvoertuig met en zonder conversiefactoren respectievelijk 14,80 mm en 11,99 mm. Gezien SCIA Engineer geen rekening houdt met conversiefactoren, kan de doorbuiging volgens de bouwkundige rekensoftware vergeleken worden met de analytisch berekende waarde zonder conversiefactoren. Hierin kan gezien worden dat er een goede overeenkomst is met slechts een afwijking van 5,09% in het midden van de centerlijn ten opzichte van de analytisch berekende waarde. De toenames tussen de doorbuiging van de rand van het brugdek en het midden en tussen het midden van het brugdek en ter hoogte van de wiellast bedragen respectievelijk 20,00% en 6,35%. De unity check voor de doorbuiging onder het dienstvoertuig ten opzichte van de maximale doorbuiging van de dwarsdoorsnede ter hoogte van de wiellasten bedraagt 0,21 en voldoet nog steeds aan de opgelegde doorbuigingseis.



**Figuur 40: 3D-weergave en dwarsdoorsnede van de doorbuiging onder dienstvoertuig**

Hetzelfde effect op de doorbuiging in de dwarsdoorsnede van het brugdek als bij het dienstvoertuig kan waargenomen worden bij de belasting van het onbedoelde voertuig. De doorbuiging bedraagt hier respectievelijk voor het midden van de centerlijn, de rand van het brugdek en ter hoogte van de wiellasten 30,3 mm, 25,2 mm en 32,0 mm. De doorbuigingsverschillen tussen het midden van de centerlijn en de randen van het brugdek en ter hoogte van de wiellasten zijn nadrukkelijker aanwezig. Hier kan een toename ten opzichte van de rand van het brugdek waargenomen worden van 20,24% voor het midden van de centerlijn en 26,98% ter hoogte van de wiellasten.





**Figuur 41: 3D-weergave en dwarsdoorsnede van de doorbuiging onder onbedoeld voertuig**

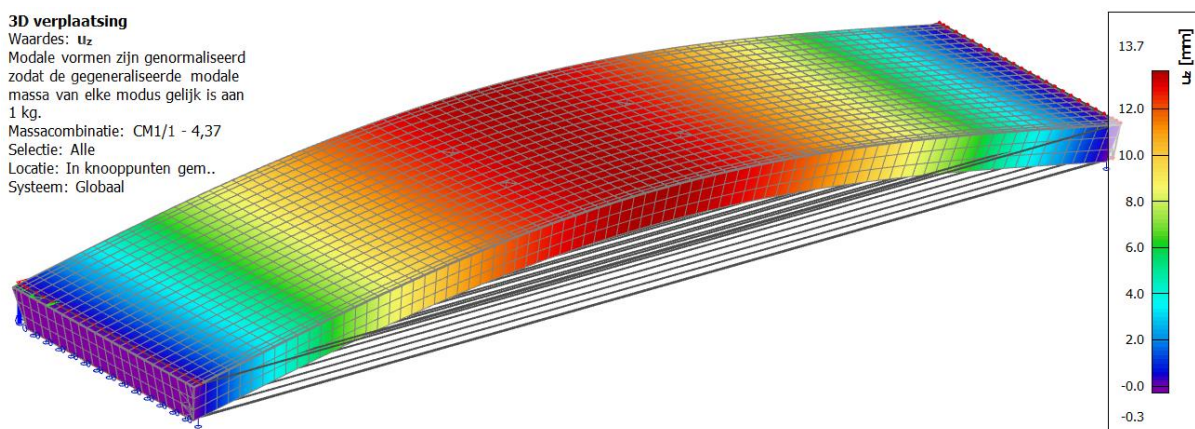
In de belastingsgevallen met het dienst- en onbedoeld voertuig is de invloed van de orthotrope materiaaleigenschappen van het GVK merkbaar door een bijkomende doorbuiging in de dwarse richting door de verschillende stijfheden in de X- en Y-richting van het brugdek. Deze bijkomende doorbuiging ten gevolge van de orthotrope eigenschappen wordt niet meegenomen in de analytische benadering met de Excel rekentool. Echter zal de analytische rekentool wel een zeer goede inschatting geven van de globale doorbuiging ten gevolge van de uniform verdeelde belasting.

### 9.3.8.3 Eigenfrequentie

Gezien het lage eigengewicht van de constructie in vergelijking met de belasting in GGT (voetgangersstroom), is het belangrijk om de eigenfrequentie van dit type GVK constructies te controleren. Hieronder worden de eigenfrequenties van het brugdek weergegeven in onbelaste en belaste toestand. De minimale eigenfrequentie voor de verschillende belastingsituaties wordt hieronder gegeven:

- Een minimale eigenfrequentie van 3,0 Hz in onbelaste toestand;
- Een minimale eigenfrequentie van 2,2 Hz onder belasting van de voetgangersstroom.

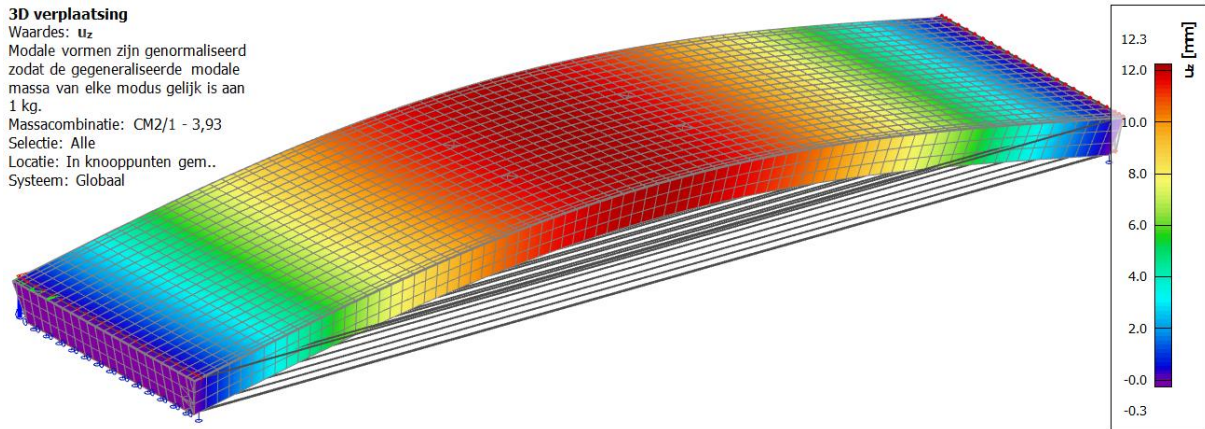
De eigenfrequentie in onbelaste toestand bedraagt 4,37 Hz in het model in SCIA Engineer, zoals weergegeven in Figuur 42. Ter vergelijking is de eigenfrequentie volgens de analytische benadering gelijk aan 3,94 Hz en 4,38 Hz respectievelijk met en zonder conversiefactoren. Dit is verschil van 0,23% tussen de waarde bekomen met SCIA Engineer en de analytische waarde zonder conversiefactoren. De unity check voor de eigenfrequentie in onbelaste toestand volgens de berekening van SCIA Engineer is gelijk aan 0,69.



**Figuur 42: Eerste natuurlijke eigenfrequentie van de brugstructuur in onbelaste toestand**

De eigenfrequentie onder een voetgangersstroom van  $0,5 \text{ P/m}^2$  bedraagt 3,93 Hz in het model, zoals weergegeven in Figuur 43. De eigenfrequentie in de analytische benadering is gelijk aan 3,76 Hz met

en 3,93 Hz zonder conversiefactoren, wat een perfecte overeenkomst is met de resultaten afkomstig uit de SCIA Engineer berekening. De controle van de eigenfrequentie onder de voetgangersstroom voldoet nog steeds met een unity check van 0,56.

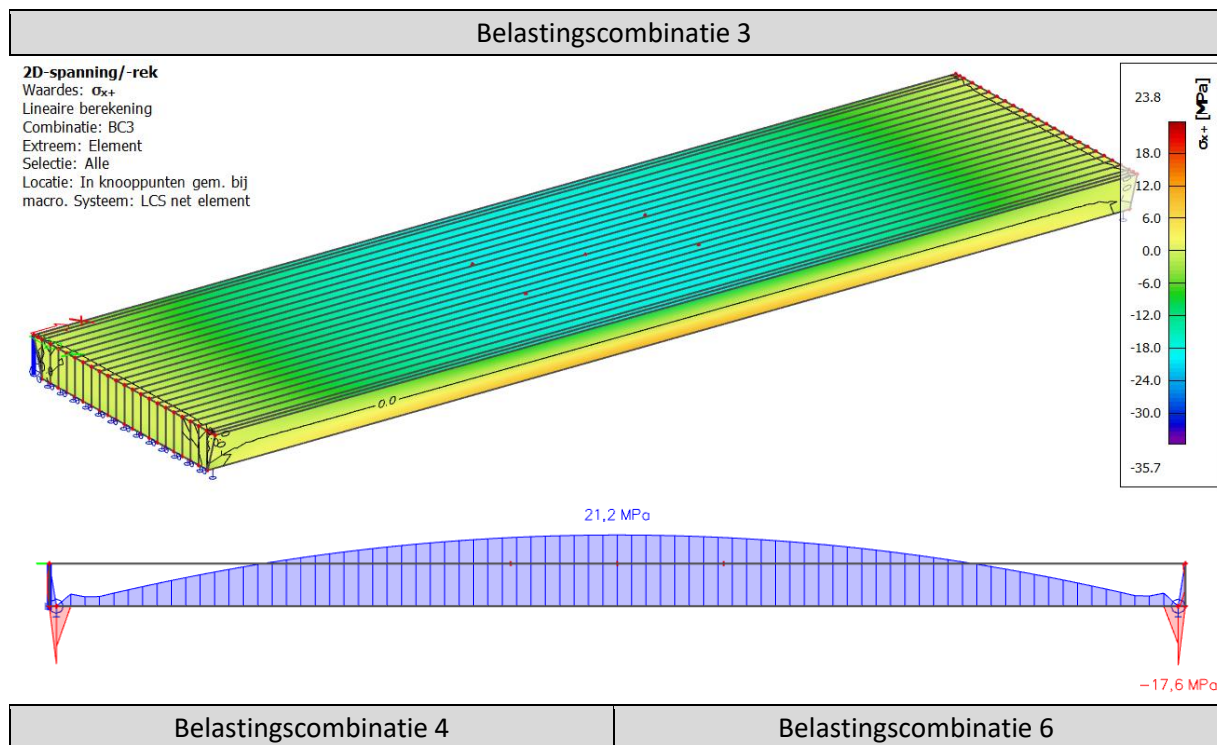


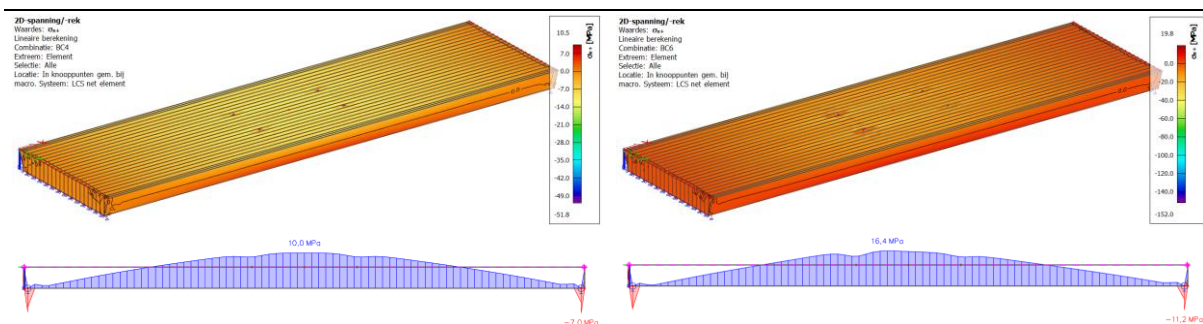
**Figuur 43: Eerste natuurlijke eigenfrequentie van de brugstructuur in belaste toestand**

9.3.8.4 Spanningen

Figuur 44 geeft de spanningen in de boven- en onderflens ten gevolge van BC3 (uniform verdeelde belasting), BC4 (dienstvoertuig) en BC6 (onbedoeld voertuig). Hieruit kan afgeleid worden dat onder BC3 de grootste spanningen optreden in de flenzen.

De maximale spanning in de middendoorsnede van het brugdek in BC3 is gelijk aan 21,2 MPa. Ter vergelijking bedraagt de spanning in de boven- en onderflens in de analytische benadering 51,9 MPa, waarbij rekening wordt gehouden met de conversie- en materiaalfactoren. Indien deze factoren buiten beschouwing worden gelaten, bedraagt de analytisch berekende spanning in de flenzen 23,5 MPa. De analytische benadering geeft een 10,85% overschatting van de waarde van de spanning volgens de berekening van SCIA Engineer.





Figuur 44: Spanningen in de onderflens van het brugdek onder BC3, BC4 en BC6

## 9.4 Samenvatting en vergelijking

De analytische Excel rekentool geeft voor de globale analyse van een GVVK brugdek een goede benadering van de doorbuiging, de eerste eigenfrequentie en de spanningen in de boven- en onderflens. Een overzicht wordt gegeven in Tabel 33. Indien echter lokale fenomenen bestudeerd dienen te worden, kan op een eenvoudige manier overgegaan worden naar bouwkundige rekensoftware zoals in dit voorbeeld SCIA Engineer. Hiermee is het mogelijk om de effecten van de structurele en materiaalorthotropie op de doorbuiging in de dwarse richting van het brugdek goed in beeld te brengen.

Tabel 33: Samenvatting en vergelijking tussen analytische benadering en SCIA Engineer

		Rekentool	SCIA Engineer	Afwijking
Massa structuur	[kg]	8713	9139	4,89%
Doorbuiging uniforme verdeelde belasting	[mm]	46,23	46,2	0,06%
Doorbuiging dienstvoertuig	[mm]	11,99	Midden: 12,6 Rand: 10,5 Wiellast: 13,4	4,84%
Eigenfrequentie onbelast	[Hz]	4,38	4,37	0,23%
Eigenfrequentie belast	[Hz]	3,93	3,93	0,00%
Spanning onderflens uniforme verdeelde belasting	[MPa]	23,5	21,2	10,85%

Echter is niet elk bouwkundig rekensoftwarepakket geschikt voor de berekening van GVVK. Zo dient de software zeker rekening te houden met de orthotrope eigenschappen van het materiaal en met de dwarskrachtvervorming die eigen is aan deze constructies. Om deze reden is bv. Buildsoft Diamonds niet geschikt voor de berekening van GVVK constructies en structuren.

In het hierboven beschreven rekenvoorbeeld werd geen gebruik gemaakt van een werkelijk uitgetekende leuning, of werden geen verdikkingen aangebracht ter hoogte van de nuttige oppervlakte ten gevolge van de slijtlaag. Samen met de schuimblokken worden deze fenomenen niet in rekening gebracht bij de berekening.

## 10 CONCLUSIE

In deze whitepaper werd de analytische berekeningswijze van een composieten fietsers- en voetgangersbrug aan de hand van een rekenvoorbeeld toegelicht, waarbij de CUR96:2019 als basis voor de berekening gebruikt werd. De whitepaper geeft hierbij inzicht in zowel de UGT als de GGT toetsingen. Aansluitend werd een Excel rekentool toegelicht die de implementatie is van de analytische berekeningswijze, maar ook op eenvoudige manier een optimalisatie naar bouwhoogte of laminaatdikte toelaat. De beschreven methodiek werd getoetst aan de hand van twee

praktijkvoorbeelden van recente composieten fietsers- en voetgangersbruggen in Vlaanderen en de whitepaper toont de uitstekende overeenkomst met de rekennota's. Eventuele verschillen worden verklaard door het niveau van detail van de rekennota's en andere basisaannames. Tot slot werd een analyse gemaakt van de courante bouwkundige rekentools en werd het rekenvoorbeeld nagerekend met behulp van SCIA Engineer. Ook in dit geval is er uitstekende overeenkomst en kunnen verschillen verklaard worden door het niveau van detail.

## REFERENTIES

SBRCURnet. (2018). CUR-Aanbeveling 96:2017 Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies. Delft: SBRCURnet.

E.J. Barbero (2018). Introduction to Composite Materials Design, Third Edition. CRC Press.

## LIJST MET FIGUREN

Figuur 1: Grafische weergave van de desbetreffende situatie voor het rekenvoorbeeld .....	6
Figuur 2: Weergave van het composieten brugdek voor de fietsers- en voetgangersbrug.....	7
Figuur 3: Schematische weergave van de gebruikte methode in de klassieke laminaattheorie .....	17
Figuur 4: Screenshot van de eLamX <sup>2</sup> software.....	18
Figuur 5: Laagopbouw bidirectioneel laminaat.....	19
Figuur 6: Spannings-rekgrafiek in een bidirectioneel laminaat.....	19
Figuur 7: Spannings-rekgrafiek in laminaat van de onderflens.....	21
Figuur 8: Kerfklassen .....	33
Figuur 9: Spanningsniveaus in de vermoeiingsbelasting.....	34
Figuur 10: Reductiecoëfficiënt verticale versnelling .....	40
Figuur 11: Aangenomen dwarsdoorsnede, afmetingen buiten proportie.....	42
Figuur 12: Aangenomen langsdoorsnede, eenvoudig opgelegd, afmetingen buiten proportie.....	42
Figuur 13: Aangenomen langsdoorsnede, dubbelzijdig ingeklemd, afmetingen buiten proportie .....	43
Figuur 14: Basic input .....	43
Figuur 15: Basic output.....	44
Figuur 16: Intermediate input .....	44
Figuur 17: Advanced input - algemeen .....	45
Figuur 18: Advanced input – materialen.....	45
Figuur 19: Advanced input – laminaatopbouw .....	46
Figuur 20: Output – Algemeen .....	47
Figuur 21: Output – eigenfrequentie .....	47
Figuur 22: Output – doorbuiging.....	47
Figuur 23: Output - verticale versnelling.....	48
Figuur 24: Output - sterkte van de flenzen .....	48
Figuur 25: Output - sterkte van de lijfplaten.....	48
Figuur 26: Visualisatie van optimalisatie.....	49
Figuur 27: Projectgegevens .....	54
Figuur 28: Definiëring van de materialen en orthotrope eigenschappen van de verschillende onderdelen van het brugdek.....	55
Figuur 29: Vervormingspatroon D- en d-parameters orthotropie .....	55
Figuur 30: Eigenschappen van 2D vloer- en wandelement.....	57
Figuur 31: Verbinden van de verschillende constructie-entiteiten.....	58
Figuur 32: Definiëring lijn- en knoopondersteuning voor de randvoorwaarden.....	59



Figuur 33: Vastleggen van subregio voor de nuttige oppervlakte op de bovenflens .....	59
Figuur 34: Uiteindelijke constructie met aanduiding van 2D-elementenonderdelen .....	60
Figuur 35: Belastinggevallen en –combinaties in SCIA Engineer .....	61
Figuur 36: Massagroepen en -combinaties in SCIA Engineer .....	62
Figuur 37: Netverfijning voor 2D-elementen in SCIA Engineer .....	63
Figuur 38: Berekeningsinstellingen in SCIA Engineer .....	63
Figuur 39: 3D-weergave en dwarsdoorsnede van de doorbuiging onder uniform verdeelde belasting .....	65
Figuur 40: 3D-weergave en dwarsdoorsnede van de doorbuiging onder dienstvoertuig .....	66
Figuur 41: 3D-weergave en dwarsdoorsnede van de doorbuiging onder onbedoeld voertuig.....	67
Figuur 42: Eerste natuurlijke eigenfrequentie van de brugstructuur in onbelaste toestand .....	67
Figuur 43: Eerste natuurlijke eigenfrequentie van de brugstructuur in belaste toestand .....	68
Figuur 44: Spanningen in de onderflens van het brugdek onder BC3, BC4 en BC6 .....	69

## LIJST MET TABELLEN

Tabel 1: Geometrische eigenschappen van het composieten brugdek .....	8
Tabel 2: Partiële materiaalfactor voor de geometrische afwijkingen en modelonzekerheden.....	9
Tabel 3: Partiële materiaalfactor voor de onzekerheden in de sterkte-eigenschappen.....	9
Tabel 4: Partiële materiaalfactor voor de specifieke weerstand .....	9
Tabel 5: Conversiefactoren voor de toetsingsaspecten in UGT en GGT .....	12
Tabel 6: Dichtheden van de gebruikte materialen in de fietsers- en voetgangersbrug.....	13
Tabel 7: Materiaaleigenschappen van de E-glasvezels .....	13
Tabel 8: Materiaaleigenschappen van het polyesterhars .....	14
Tabel 9: Karakteristieke stijfheidswaarden UD-lamel .....	15
Tabel 10: Karakteristieke rekgrenzen en sterktewaarden UD-lamel .....	15
Tabel 11: Opbouw van de laminaten in het brugdek.....	16
Tabel 12: Stijfheids- en sterktewaarden voor de laminaten in het brugdek.....	16
Tabel 13: Rekken, spanningen en faalmodi in een bidirectioneel laminaat .....	19
Tabel 14: First en last ply failure waardes voor verschillende belastinggevallen voor het bidirectioneel laminaat.....	19
Tabel 15: Rekken, spanningen en faalmodi in het laminaat van de onderflens .....	20
Tabel 16: First en last ply failure waardes voor verschillende belastinggevallen voor het laminaat van de onderflens .....	21
Tabel 17: Normen voor materiaalproeven volgens de CUR-aanbevelingen (SBRCURnet, 2018) .....	23
Tabel 18: Permanente massa aanwezig op het composieten brugdek .....	24

---

Tabel 19: Tijdelijke belastingen .....	24
Tabel 20: Buitengewone belasting .....	25
Tabel 21: Verkeerssituaties op voetgangersbrug.....	38
Tabel 22: Toetsing eigenfrequenties.....	38
Tabel 23: Comfortklassen.....	39
Tabel 24: Constanten in comfortanalyse .....	40
Tabel 25: Resultaten comfortanalyse.....	41
Tabel 26: Vergelijking resultaten voor de fietsers- en voetgangersbrug in Puurs .....	50
Tabel 27: Vergelijking resultaten voor de fietsers- en voetgangersbrug in Mortsel .....	51
Tabel 28: Laminaateigenschappen onderdelen brugdekstructuur .....	54
Tabel 29: Berekende plaat- en membraanstijfheden voor de brugonderdelen .....	56
Tabel 30: Berekening belasting t.g.v. schuimkern.....	61
Tabel 31: Berekening belasting t.g.v. slijtlaag .....	61
Tabel 32: Berekening eigengewicht .....	64
Tabel 33: Samenvatting en vergelijking tussen analytische benadering en SCIA Engineer .....	69