Gemeente Rotterdam

# P085 - Reefbrug

Voorlopig Ontwerp gebruik oude windturbinebladen als hoofddraagconstructie

Versie 1.0




**Van:** WD Schutte, PJ. van der Laarse, L. Tromp, MPAM. Verheijen, B. Kloeg, M. Mesfim, HJ de Waard, T Kroos, C. Cosijn, S Bardak-Hristov

**Datum:** 2 oktober 2026

**Cluster** Stadsontwikkeling

# Inhoudsopgave


| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Inleiding** | **3** |
| **2** | **Samenvatting** | **4** |
| **3** | **Reefbrug** | **5** |
| 3.1 | Locatie | 5 |
| 3.2 | Flora en fauna | 6 |
| 3.3 | Waterschap | 6 |
| 3.4 | Ontplofbare Oorlogsresten | 6 |
| 3.5 | Kabels en Leidingen | 7 |
| 3.6 | Duurzaamheid | 7 |
| **4** | **Ontwerp** | **8** |
| 4.1 | Afstemming ACOR | 10 |
| **5** | **Inpassing omgeving** | **11** |
| **6** | **Constructief ontwerp** | **15** |
| 6.1 | Kritische details | 16 |
| 6.1.1 | Dwarsdrager – turbineligger | 17 |
| 6.1.2 | Dwarsdrager – dek - leuning | 18 |
| 6.2 | Fundering | 18 |
| **7** | **Testprotocol** | **19** |
| 7.1 | Naamgevingsconventies | 19 |
| 7.2 | Burn-off tests | 20 |
| 7.3 | Coupontests | 21 |
| **8** | **DO-fase** | **23** |
| 8.1 | Aandachtspunten DO-fase | 23 |
| **9** | **Bijlagen** | **24** |

# 1 Inleiding

De Reefbrug (beheercode P085) is een houten fietsvoetgangersbrug in Rotterdam-Zuid in de wijk Zuidwijk aan de grens met de gemeente Barendrecht. De brug dient te worden vervangen, omdat de bestaande constructie technisch einde levensduur is. De vervanging van de brug wordt namens Stedelijk Beheer gebruikt als casus voor het hergebruiken van afgeschreven windturbinebladen uit de windenergiesector hierna te noemen ‘turbineliggers’, als hoofddraagconstructie in een brug.. In bredere zin is het een pilot voor het gebruik van secundaire materialen in GWW-constructies. Door secundaire materialen te gebruiken draagt het project bij aan het behalen van Rotterdamse klimaatdoelstellingen en helpt het met het oplossen van een bestaand afvalprobleem in de windenergiesector.

Dit rapport dient als eindproduct van de Voorlopig Ontwerpfase voor de Reefbrug, zoals gedefinieerd in het Plan van Aanpak (P085_PvA_28-02-2024_def). Het volgt op de schetsontwerpfase (P085_Bureaustudie_rapport_v1.1.pdf) waarin is verkend in welke oriëntatie de bladen kunnen worden gebruikt en hoe de watergang kan worden overspannen zonder steunpunten in de watergang te plaatsen.

Het VO volgt op het SchetsOntwerp (SO) en vormt de basis voor detailuitwerking in het Definitief Ontwerp (DO).

# 2 Samenvatting

In de VO-fase zijn de hoofdafmetingen en de belangrijkste principedetails van de brug beschouwd en vastgelegd.

De brug is zo ontworpen dat elk element waaruit de brug is opgebouwd afzonderlijk herkenbaar is en de elementen onderling zo veel mogelijk remontabel aan elkaar zijn gekoppeld. De brug overbrugt de watergang met een hoofdoverspanning van 14 m. Twee separate aanbruggen van 4m lang sluiten aan op de taluds.

In afwijking op de conclusie van de schetsontwerpfase is in deze VO-fase vastgesteld dat de turbineliggers vrij opgelegd kunnen worden in plaats van deze in te klemmen op een eindsteunpunt. De liggers zijn daarvoor voldoende stijf. Drukkrachten bovenin de doorsnede van de turbineligger beperken de maximale vrije overspanning tot de toegepaste 14 m. Het verlaten van de inklemming reduceert krachten op de fundering en bespaart zo kosten en materiaal.

De constructieve analyses van de turbineliggers zijn gedaan door Haskoning in samenwerking met Infrablades. De analyses zijn gebaseerd op doorsnedemetingen en materiaaleigenschappen welke zijn ontleend aan materiaaltesten op een derde blad van hetzelfde type en van dezelfde turbine. Deze zijn gedaan door TU Delft, faculteit Civiele techniek & Geowetenschappen. Alle drie de bladen hebben in de eerste levenscyclus één set gevormd. Extra testen zijn en worden in vervolgfasen uitgevoerd in het kader van SPUK-KCI regeling ten behoeve van kennisontwikkeling en kennisdeling.

Het voorliggende ontwerp wordt constructief haalbaar geacht en is qua vormgeving afgestemd met de Advies Commissie Openbare Ruimte (ACOR). Het VO vormt ook de basis voor het aanvragen van de bouwvergunning en de watervergunning. De bouwtechnische toets wordt uitgevoerd door Bouwtoezicht Rotterdam, omdat composiet niet onder de WKB-regeling valt.

Definitief Ontwerp en contractvorming worden in KW3-4 van 2026 gerealiseerd.

# 3 Reefbrug

De Reefbrug, objectcode P085, is een bestaande langzaamverkeersbrug in Rotterdam Zuidwijk die de Ellemare verbindt met het Havenspoorpad.



Figuur 1 - Overzichtsfoto Reefbrug

De bestaande brug (figuur 1) bestaat uit een volledig houten constructie en wordt volledig verwijderd. In aansluiting op circulaire principes wordt de brug gedemonteerd. Het hout wordt geoogst voor hergebruik en vervoerd naar Urban Miner in 's Gravendeel voor verwerking en opslag. De omgeving en bijbehorende randvoorwaarden zijn opgenomen in de standaard checklist, opgenomen in bijlage E.

## 3.1 Locatie

De brug sluit aan op het Havenspoorpad. Het Havenspoorpad is een doorgaand fietspad dat tussen Rotterdam Lombardijen en de Waalhaven loopt. Locatiebezoeken suggereren een lichte maar redelijk constante stroom langzaam verkeer over de brug.




Figuur 2 - Locatie Reefbrug

Er zijn voor zover bekend geen bijzondere activiteiten, instellingen of bedrijven aanwezig in de directe omgeving die qua ontwerp/uitvoering invloed hebben op de vervanging van de brug. Wel zijn de aanlandingen van de brug omgeven door hoge rietkragen en er staat een hoge boom direct naast de noordelijke aanlanding van de brug.

De bestaande brug heeft een nuttige breedte van 2,5 m. Deze breedte blijft gehandhaafd. De totale breedte van de nieuwe brug wordt door het gebruik van de turbineliggers significant breder dan de bestaande brug.

## 3.2 Flora en fauna

Een ecologische quickscan van de omgeving is aangevraagd bij Stadsecologen. Ten tijde van het opstellen van dit fasedocument zijn er nog geen onderzoeksresultaten beschikbaar. Het projectteam neemt wel voorshands de volgende maatregelen:

- De nieuwe brug wordt wordt 6 m verder van de bestaande boom geplaatst dan de bestaande brug, zoals verder toegelicht in hoofdstuk 5.
- Voor zover het wortelstelsel van de boom verweven blijkt te zijn met de fundering/onderbouw van de bestaande brug worden die constructiedelen, indien nodig, achter gelaten in de grond.
- De uitvoering van het werk wordt voorzien vanaf september 2027 tot uiterlijk einde van het jaar, buiten de kwetsbare periodes van de meeste diersoorten.

## 3.3 Waterschap

De watergang betreft volgens de legger van het Waterschap Hollandse Delta een hoofdwatergang. Daarvoor geldt door Profiel van Vrije Ruimte = BxH = 2500x1100mm.
Het schouwpeil is NAP-2,40m. De ontwerptekeningen gaan uit van NAP-2,30, waardoor een marge ontstaat voor uitvoeringsfouten. Dit is relevant omdat de positionering van de bladen als risico wordt aangemerkt.

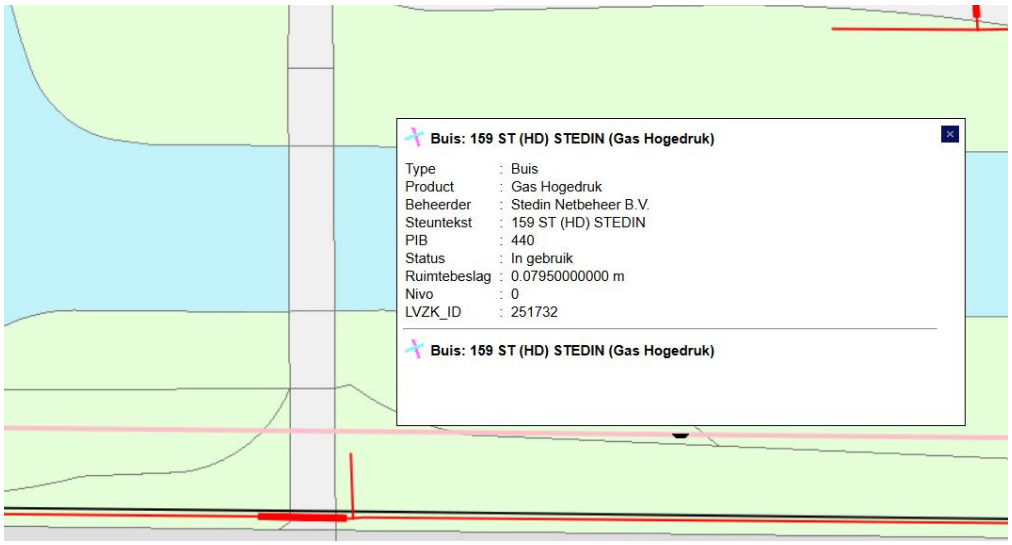
WSHD hanteert de eis dat steunpunten in de watergang niet zijn toegestaan, tenzij WSHD daar expliciet toestemming voor geeft als de aanvrager duidelijk maakt dat steunpunten absoluut noodzakelijk zijn. Het VO houdt hier rekening mee door geen steunpunten in de watergang te plaatsen.

Verder dienen de taluds te worden voorzien van taludbescherming onder de brug in de vorm van open grasbetontegels. Beschoeiingen worden aangebracht tot minimaal 2 m naast de brug aan alle kanten. Een en ander zoals voorgeschreven door WSHD.

## 3.4 Ontplofbare Oorlogsresten

De publieke bommenkaart is geraadpleegd en daaruit volgen geen verdenkingen van ontplofbare oorlogsresten.

## 3.5 Kabels en Leidingen




Figuur 3 - K&L Reefbrug

Gisweb toont een potentieel conflict met een hogedruk gasleiding van Stedin in de berm van het Havenspoorpad. Een KLIC oriëntatiemelding toont geen aanwezigheid van de gasleiding. Nader contact met leidingbeheerder Stedin heeft bevestigt dat er geen gasleiding op locatie aanwezig is.

## 3.6 Duurzaamheid

Binnen de asset management plannen van stedelijk beheer wordt voor circulair werken de volgende getrapte benadering gehanteerd bij het ontwerpen van nieuwe constructies.

1. Gebruik van secundaire materialen
2. Gebruik van hernieuwbare materialen
3. Gebruik van duurzamer alternatieve materialen t.o.v. traditionele materialen
4. Gebruik van traditionele materialen

Project Reefbrug sluit aan op principe 1, het gebruik van secundaire materialen. De turbinebladen die worden gebruikt zijn afgedankt in hun originele functie. Het toepassen van secundaire materialen beperkt zich tot de turbineliggers. Het gebruik van de turbineliggers is complex. Om geen risico's te stapelen worden de overige elementen van primaire grondstoffen gemaakt. Dit project is een pilot waarin de gemeente ervaring opdoet met het werken met secundaire materialen/elementen. Daarom ligt de focus enkel daarop. De lessen van dit project kunnen generiek worden geprojecteerd op werken met andere secundaire materialen. In het kader van risicobeperking worden er geen aanvullende innovatieve, duurzame technieken toegepast in dit project.

De bestaande houten brug wordt gedemonteerd. Het hout wordt geoogst voor hergebruik en vervoerd naar Urban Miner in 's Gravendeel voor verwerking en opslag.

# 4 Ontwerp

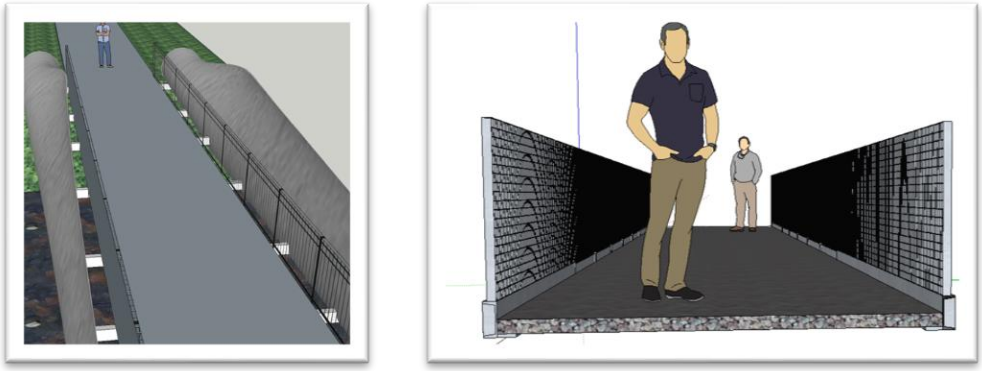
De Reefbrug is een pilot waarbij gebruikte windturbinebladen gebruikt worden als turbineliggers. Hiervoor dient veel nieuwe kennis en ervaring opgebouwd te worden. Dit geldt niet alleen voor de ontwerp- en realisatiefase maar ook voor de gebruiks- en after-project fase. In de gebruiksfase zal Stedelijk Beheer veel ervaring opbouwen met het onderhouden en beheren van bruggen op basis van turbineliggers. Voor de eindelevensfase is het van belang dat de materialen die in de brug toegepast worden 'geoogst' kunnen worden en als bouwmateriaal in weer nieuwe projecten gebruikt kunnen worden.

Het VO is een doorontwikkeling van het SO. De oriëntatie van de bladen en de relatie met het loopdek zijn behouden. Het beeld uit het SO is gehandhaafd. Op basis van een aantal verkenningen is er voor het ontwerp van de brug voor gekozen de brug zo te ontwerpen dat elk element waaruit de brug is opgebouwd afzonderlijk herkenbaar is en de elementen onderling zo veel mogelijk remontabel aan elkaar zijn gekoppeld. Iedere passant zal ter plekke kunnen begrijpen uit welke elementen en hoe de brug is opgebouwd. Deze opzet heeft tevens voordelen voor het productie- en montageproces en maakt onderhoud en beheer eenvoudiger (inspectie, vervangen onderdelen, etc.)

Het ruimtelijk ontwerp van de brug is in een iteratief proces tussen architect en ingenieur tot stand gekomen. Kennis van de interne krachtswerking van een turbineligger, verkregen uit onder meer laboratorium proeven, was benodigd om een eerste opzet voor de brug te schetsen. Op basis van die eerste schetsen is m.b.v. een constructief model de krachtenwerking gemodelleerd. De resultaten van deze modelberekeningen waren weer input voor het verbeteren van het schetsontwerp, etc. Na een aantal iteratieve stappen heeft dit geresulteerd in een ontwerp dat de basis vormt voor dit VO. In hoofdlijnen komt het ontwerp neer op:

- Twee turbineliggers maken de sprong over het water.
- Deze turbineliggers 'liggen rechtop' zodat maximaal gebruik gemaakt wordt van de beperkte constructieruimte onder de brug onder invloed van waterschaps-eisen.
- De turbineliggers op zich blijven onaangeroerd. Deze worden dus niet versterkt of verzaagd.
- Om de turbineliggers niet in te hoeven korten (ivm waardebehoud ligger) liggen deze aan de havenspoorzijde een aantal meters op land. Aan de stadszijde kunnen de liggers niet uitsteken vanwege het lagere peil van het land aan deze zijde van het water.
- Aan deze landzijde bevinden zich de tippen van de turbinewieken. Deze uiteinden zijn zwakker dan de root-zijde en te zwak om het dek te dragen. Vandaar dat een steunpunt op grens land-water nodig is aan de noordoever.
- Aan deze turbineliggers worden op hoogte van de inwendige dwarskrachtschotten (shear webs) beugels bevestigd met een onderlinge afstand van 2,0 m.
- In deze beugels worden dwarsbalken gehangen.
- Op deze dwarsbalken wordt een composiet dek geplaatst.
- Dit dek wordt vastgezet tussen randbalken met daarop de eigenlijke brugleuning.
- De brug ligt niet in een fietsroute: de randbalk+ leuning zijn daarom 100 cm hoog, gerekend vanaf bovenkant dek.

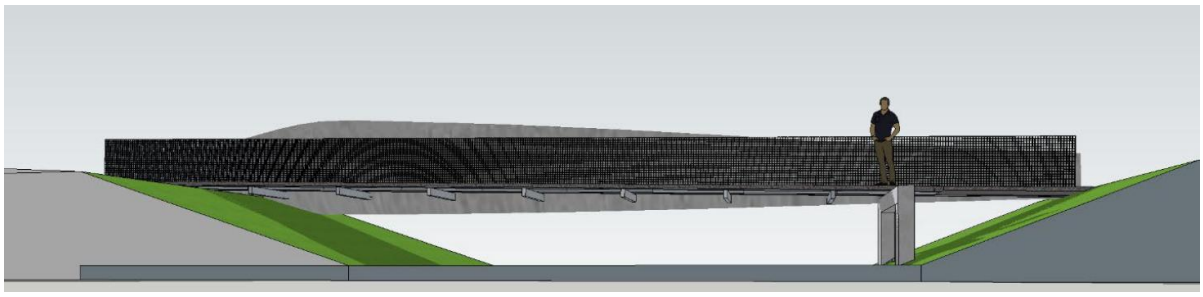
- De leuning zelf bestaat uit een verzinkt stalen kartonnage-rooster met striphoogte van 50mm in combinatie met een maaswijdte 50mm. Deze leuning voldoet aan geldende wet en regelgeving voor brugleuningen en beschermt de turbineliggers tegen vandalisme en gebruiks-beschadigingen.



Figuur 4 – helikopterperspectief en dwarsdoorsnede brugdek + leuning

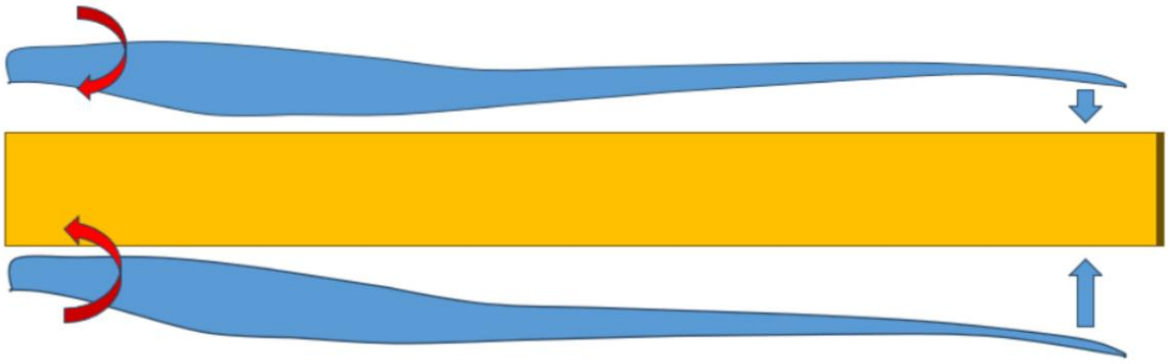
- Beugels, dwarsbalken en randbalken worden onderling met boutverbindingen verbonden
- Tussen de recht uitgevoerde randbalken en de naastgelegen organische vorm van de turbineliggers blijft een open ruimte zodat passanten zowel de gehele turbineliggers kunnen zien als de wijze waarop één en ander aan elkaar verbonden is
- de brug wordt in een flauwe helling gelegd om goed aan te sluiten op beide landzijden, rekening houdende met het vereiste profiel van vrije ruimte

Niet enkel qua onderdelen en wijze van monteren is het ontwerp ‘low-on-form’. Ook qua kleurstelling zal het geheel terughoudend zijn, low-on-colour, om alle aandacht naar het unieke van deze brug te laten gaan: het hergebruiken van windturbinebladen. Hiervoor zullen in de DO fase de juiste grijstinten bepaald gaan worden. Wel wordt overwogen aan de rootzijde een informatiepaneel in het project op te nemen om passanten te informeren over de pilot.



Figuur 5 - Langsdoorsnede

Om de spleet tussen wiek en dek over de hele lengte niet te groot te laten worden de wieken iets naar elkaar toegedraaid worden De opening zal nooit overal gelijk zijn maar door deze actie zal de wiek niet ver af gaan wijken van het dek



Figuur 6 – Bovenaanzicht oriëntatie turbineliggers

## 4.1 Afstemming ACOR

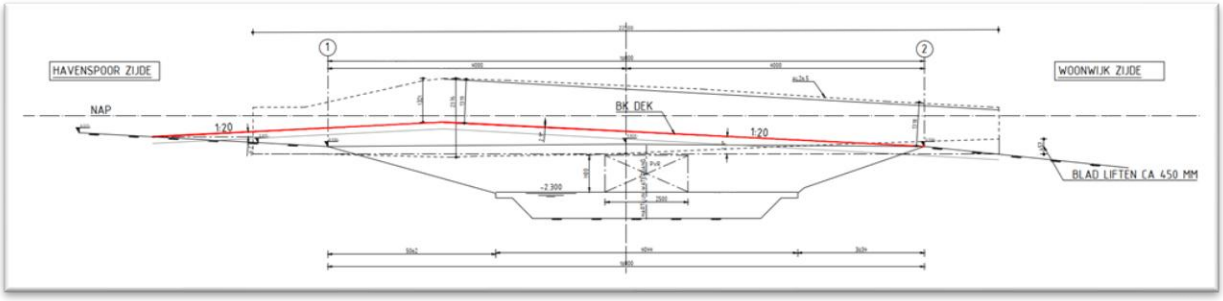
Het ontwerp is gepresenteerd aan de ACOR, die hierop positief heeft geadviseerd, met dien verstande dat deze brug een unicum is en het de bedoeling is dat dit concept niet in deze vormgeving op grote schaal binnen de gemeente wordt uitgerold. Goedkeuring van de ACOR is een belangrijk uitgangspunt bij de welstandstoets in het vergunningsproces.

# 5 Inpassing omgeving

De inpassing van de brug in de omgeving zoals in hoofdstuk 4 kort omschreven is hier nader toegelicht. Er is rekening gehouden met de volgende punten:

- Schouwpeil watergang
- Profiel van Vrije Ruimte WSHD (BxH = 2,50x1,10m)
- Hoogte aansluitende paden
- Formaat turbineligger
- Beleving gebruikers

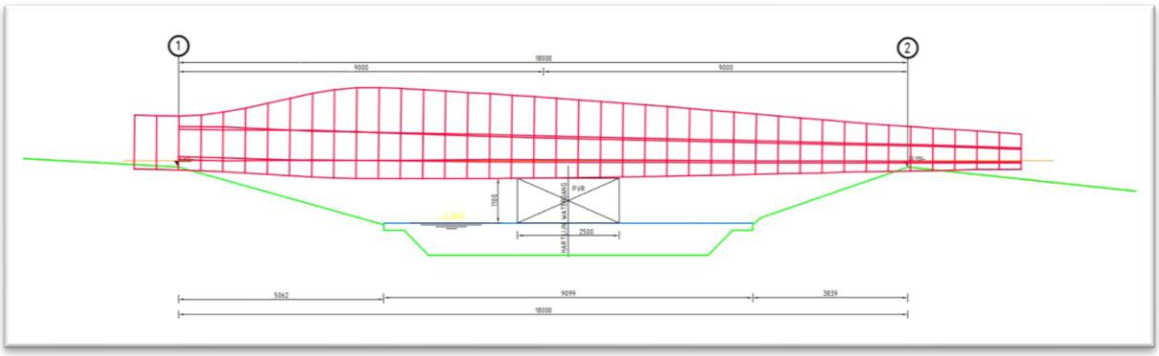
In de schetsontwerpfase is op basis van een turbineligger type AL26 beschouwd of een brug inpasbaar is. Daarbij is verondersteld dat het dek in hoogte zou kunnen verlopen om goede aansluiting te vinden op bestaande paden en tegelijkertijd de leuninghoogte voor gebruikers beperkt te houden, zodat zij zich niet opgesloten zouden voelen.




Figuur 7 - Schetsontwerp Reefbrug op basis van blad type AL26

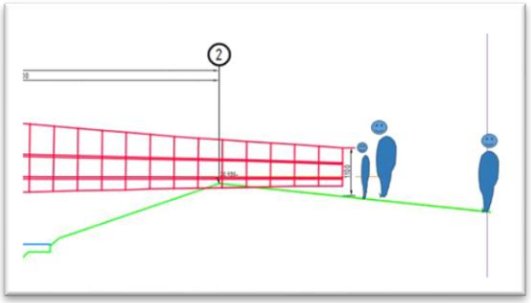
In het schetsontwerp is al vastgesteld dat de turbineliggers rechtop (edge-wise) moeten worden toegepast. Plat (flap-wise) onder het dek toegepast wordt de totale constructiehoogte veel te hoog voor de beschikbare ruimte in de watergang. Merk ook op dat het blad type AL26 is vervangen door bladen van type LM25.5. Hiervoor in het schetsontwerp reden gegeven, namelijk dat de AL26 van hout is gemaakt, het geen niet past binnen de doelstellingen en de beschikbare expertise binnen dit project.

Het blad type LM 25.5 is driedimensionaal ingemeten en een tweedimensionale projectie ervan op het natte profiel van de watergang is gegeven in figuur 8. In deze projectie is stramien 1 aan de zijde Havenspoorpad (zuid) en stramien 2 aan de zijde van de woonwijk Ellemare (noord).



Figuur 8 – Projectie turbineligger LM25,5 over watergang Reef

Opvalt dat bij stramien 2 de turbineligger hoog ligt ten opzichte van het maaiveld. Het levert een beeld op dat beide tips hoog in de open lucht komen te hangen. Daarbij steken ze ook nog 2 a 3 meter uit en zijn meer dan een meter hoog (fig. 9). Dat is qua beeld en voor de beleving van gebruikers onwenselijk. Merk op dat de echte tip-secties van de bladen hierbij al zijn verwijderd.

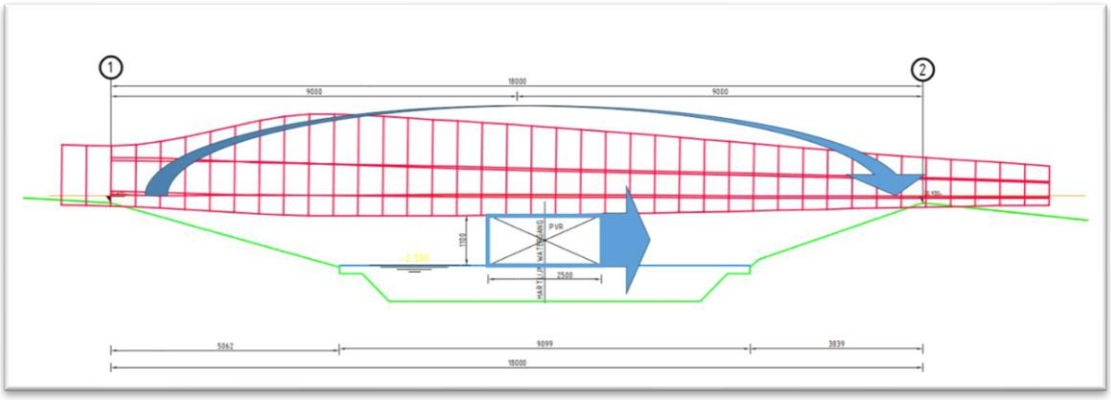



Figuur 9 - uitstekende uiteindes van turbineligger

Het zou kunnen worden opgelost door de bladen 180 graden te draaien zodat de uitstekende delen bij stramien 1 zitten. Er is echter bewust gekozen om de ROOT van de ligger aan de zijde Havenspoorpad te leggen. Zoals het profiel van de watergang toont ligt de brug als geheel al relatief hoog ten opzichte van de woningen aan de Ellemare. Als dan ook de bijna 2 m hoge root-secties aan die zijde komen te liggen dan geeft dat een te dominant beeld tegenover de relatief kleine huizen aan de Ellemare. Aan de zijde Havenspoorpad speelt dat probleem niet, omdat de brug daar relatief lager ligt t.o.v. zijn omgeving en het Havenspoorpad een weidser en meer open karakter heeft waar de brug tegen wegvalt.

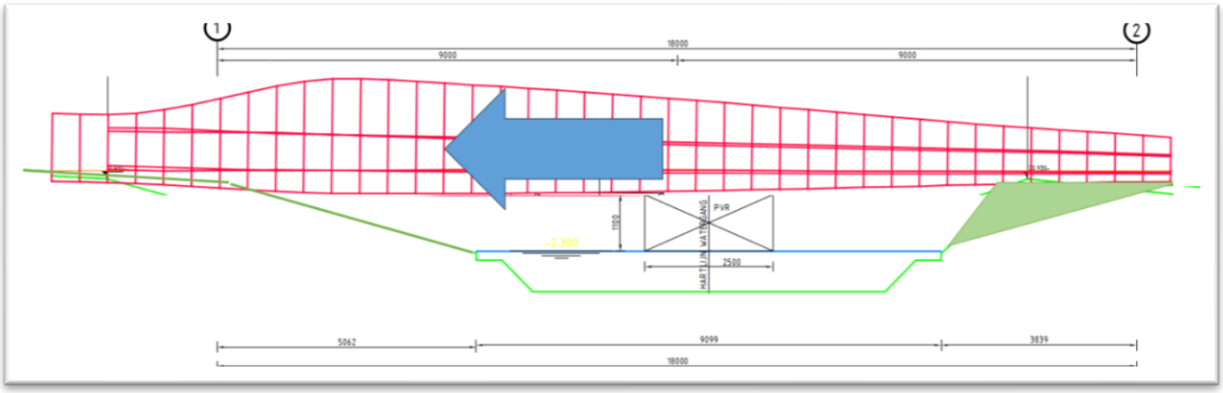
Er is ook overwogen om de twee turbineliggers in tegengestelde richting te leggen, maar dat heeft als gevolg dat op elke dwarsdoorsnede de twee draagliggers een ongelijke stijfheid hebben wat zou resulteren in enige verdraaiing van het brugdek onder belasting.

Om de aansluiting bij stramien 2 zo goed mogelijk te maken is de turbineligger onder een lichte helling geplaatst (ca. 2%) , zodat het loopvlak bij stramien 2 iets lager ligt dan bij stramien 1. Ook wordt het PvR iets opgeschoven om de turbineligger zo laag mogelijk te plaatsen (fig. 10).




Figuur 10 - Kanteling turbineliggers

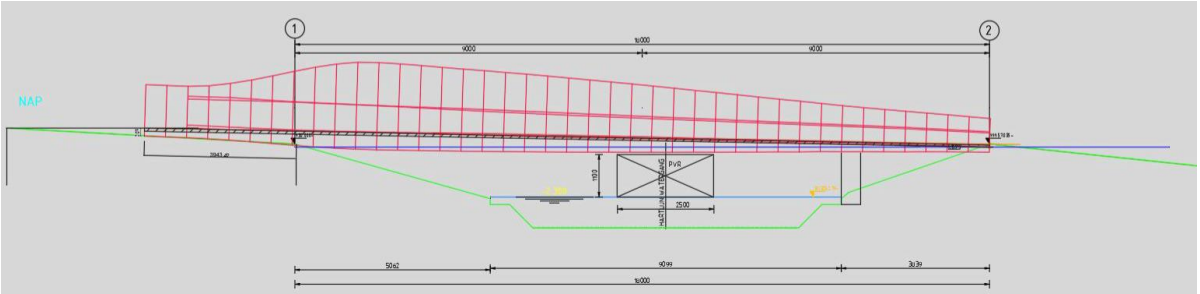
Om het probleem van de uitstekende uiteindes bij stramien 2 op te lossen worden de turbineliggers zover mogelijk naar het zuiden (links) geschoven. Dat betekent dat de bladen richting het Havenspoorpad redelijk ver in het talud steken. Dat wordt als acceptabel beschouwd (fig. 11).



Figuur 11 - Opschuiven turbineliggers

Het loopvlak moet zo laag mogelijk liggen, zodat het loopvlak goed aansluit op het maaiveld Het dek komt ter hoogte van de onderste shearweb te liggen. Vanuit de architectonische vormgeving wordt een sterk op-, en aflopend loopvlak als onwenselijk gezien. Het dek moet zoveel mogelijk vlak zijn.

Alles bij elkaar resulteert in een langsprofiel zoals weergegeven in figuur 12



Figuur 12 - Langsprofiel Reefbrug

Het uiteinde van de turbineligger ligt precies op de insteek van het talud ter plaatse van stramien 2. Om de overspanning te beperken wordt een steunpunt geplaatst op de teen van het talud. Het steunpunt wordt zo vormgegeven dat de zichtlijnen van het talud niet volledig worden geblokkeerd. Het dek wordt zo geplaatst dat er geen ophogingen nodig zijn om het talud te laten aansluiten bij het dek.

Het profiel van de watergang laat zien dat er voor de aanleg van de bestaande houten brug al een ophoging is gerealiseerd ter plaatse van stramien 2. Het pad ter plaatse van de brug heeft op dit moment een steile helling. van 7 graden. Verder laat het bovenaanzicht van de situatie ter plekke zien dat de bestaande brug vlak naast een grote boom staat.

Het wortelstelsel van de boom zit in de weg voor realisatie van de brug met als mogelijk gevolg instabiliteit en/of sterfte van de boom. Dat zou een gevaarlijke situatie creëren. Om beide problemen op te lossen wordt de brug 6 meter naar het oosten verschoven.




Figuur 13 - Bovenaanzicht bestaande en nieuwe brug

Door de paden langs de Ellemare te verleggen en onder een hoek te laten aansluiten op de brug wordt de lengte van de helling naar de brug langer en dus de hellingshoek lager, het geen de toegankelijkheid verbetert. Binnen het op figuur 13 aangegeven groene vlak dient het bestaande talud te worden aangevuld om op dezelfde hoogte als de aanlanding bij de bestaande brug uit te komen. Dit is nodig omdat het PvR verdere verlaging van de brug verhindert. Bijkomend voordeel van het verplaatsen van de brug is dat tijdens de bouwfase de bestaande brug in gebruik kan blijven.

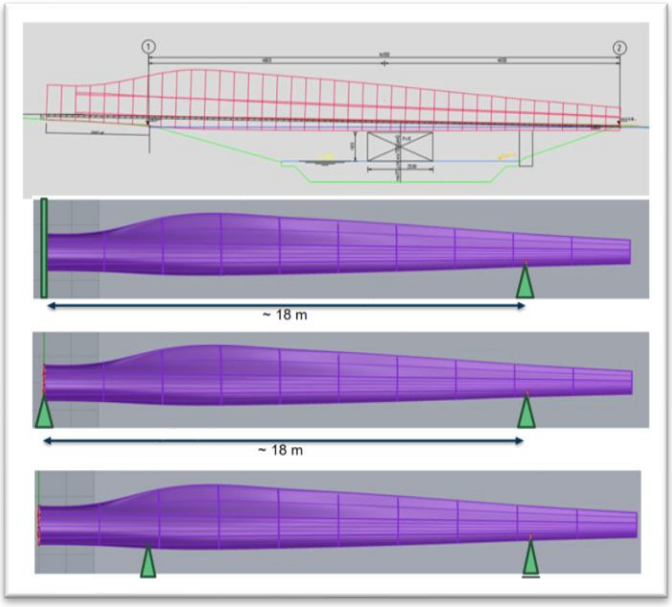
# 6 Constructief ontwerp

Het VO is gebaseerd op een driedimensionale meting van het blad, als mede op doorsnedemetingen. Van het VO is een uitgangspuntenrapport en een berekeningsrapport opgesteld ten behoeve van het aanvragen van de bouwvergunning. Deze zijn opgenomen in bijlagen B en C. Hieronder volgens de belangrijkste conclusies.

Vanuit het schetsontwerp is het inklemmen van het blad bij de *root* als optie voorzien om de overspanning te maximaliseren. Op basis van verkennende berekeningen in de VO-fase bleek dat de spanningen en de vervormingen van het ingeklemde blad zo laag zijn dat een vrij opgelegde variant haalbaar zou kunnen zijn. Dat zou significante voordelen hebben:

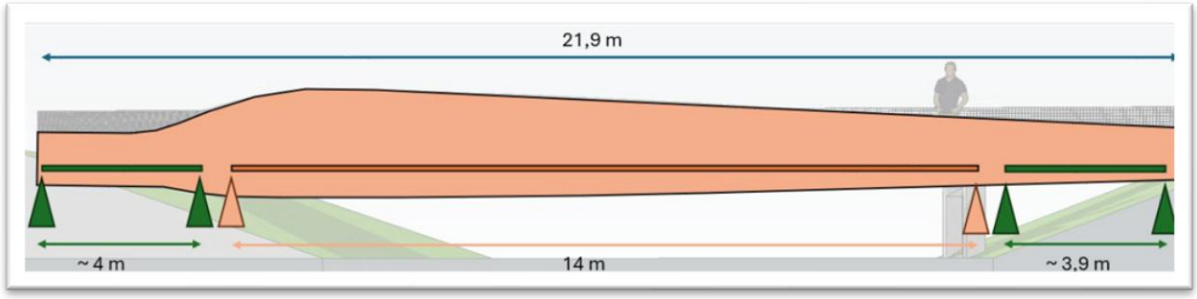
- De meeste vermoeiingsschade wordt verwacht bij de *root* waar de bouten de wiek verbonden met de as van de windmolen. Die ankers zouden ook worden aangesproken voor de inklemming. Het niet inklemmen geeft een robuustere en veiligere constructie, omdat onderdelen met hoge vermoeiingsschade niet worden gebruikt t.b.v. de krachtswerking.
- Door eenvoudig op te leggen vervalt de noodzaak tot een zware fundering. Dat geeft een reductie in bouwkosten en milieukosten. Daartegenover staan wel twee extra lichte oplegpunten voor de dekconstructie.

Er is dus een beschouwing gedaan van de turbineligger als vrij opgelegde balk met een overspanning van 18 m. De BGT bleek te voldoen, maar in de UGT ontstaan er als gevolg van buiging drukspanningen in de slanke bovenzijde van de turbineligger die tot lokale instabiliteit zouden leiden. Daarom is de overspanning gereduceerd door de oplegging aan de zijde van het Havenspoorpad naar voren te schuiven (fig. 14). Dat kan onzichtbaar omdat de turbineligger ver het maaiveld insteekt. De overspanning kan met ca. 4 m worden gereduceerd tot 14 m. Met deze overspanning voldoet de turbineligger zowel in de BGT als de UGT.



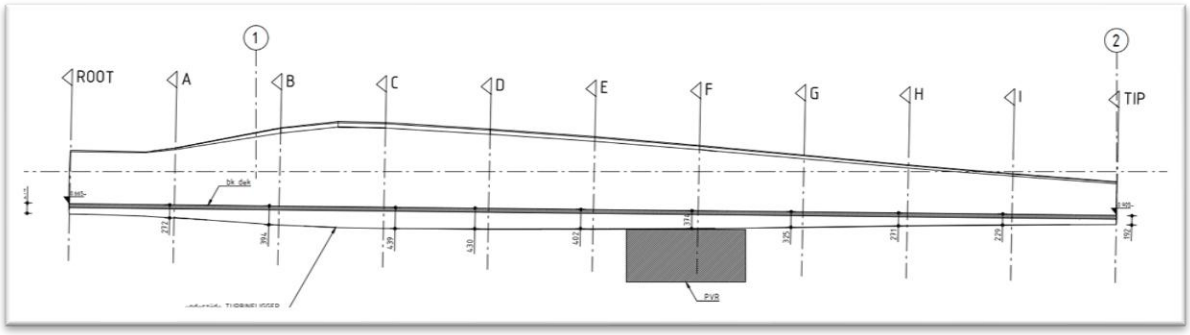

Figuur 14 - Varianten hoofdoverspanning Reefbrug

Er komt dus een landhoofd recht op stramienlijn 1 (= aanlanding bestaande brug) en een steunpunt op de teen van het talud aan de zijde van de Ellemare. Aan beide uiteindes van de turbineligger is dus sprake van een stuk overstek. Het statisch schema ziet er dan als volgt uit (fig. 15)




Figuur 15 -Statisch schema turbineliggers Reefbrug

Het brugdek wordt gevormd door een composiet sandwichdek op stalen dwarsbalken. De dwarsbalken worden aan de turbineliggers bevestigd. Dit is één van de kritische details waar in alinea 6.1 verder op wordt ingegaan. Beeldbepalend is dat in geen geval de dekconstructie onder de turbineligger mag uitsteken. Bij beide uitstekken is onvoldoende ruimte beschikbaar om een dek en dwarsdragers te plaatsen zonder dat het aan de onderkant uitsteekt (fig. 16). Op die plekken is het brugdek zelfdragend (dus zonder dwarsdragers). Het betreft een overspanning van maximaal 4 m. De beide uiteindes worden voorzien van een oplegbalk en worden net als de hoofddraagpunten op palen gefundeerd.




Figuur 16 - Beschikbare ruimte voor dekconstructie variërend van 19 – 43 cm.

Met de opdrachtgever is afgestemd dat er geen voertuigen op de brug worden voorzien. Dat geldt zowel voor dienstvoertuigen als voor onbedoelde voertuigen. Dit heeft een gunstige invloed op het maximale lokale belastingeffect op dwarsbalken en de bevestiging aan de turbineligger. Ook levert dit besparingen op in de fundering. Permanente obstakels voor de brug zijn daardoor vereist om voertuigen op de brug uit te sluiten.

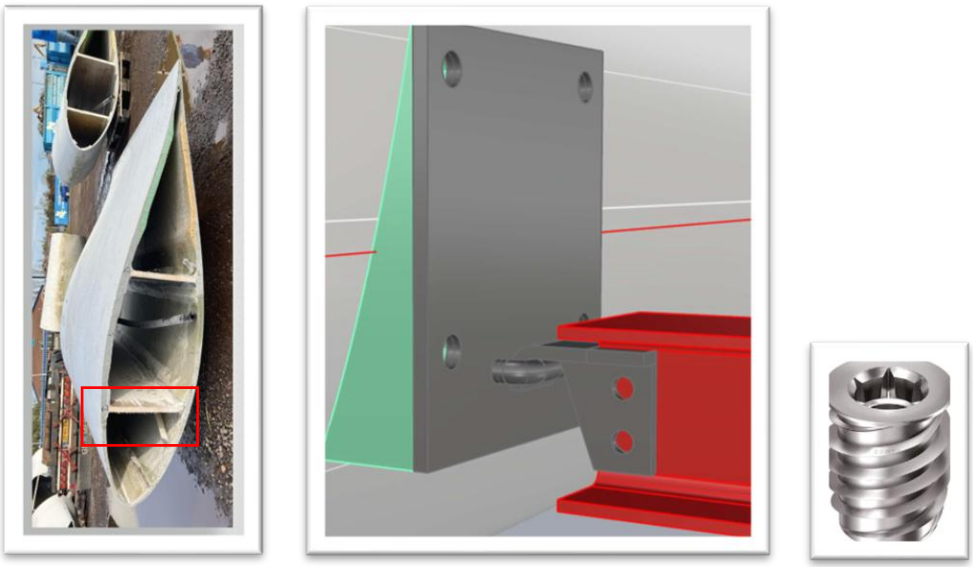
## 6.1 Kritische details

Aan een aantal kritische ontwerpdetails is in de VO-fase extra aandacht besteed, dit zijn:

1. Verbinding dwarsdrager – turbineligger
2. Verbinding dek – dwarsdrager – leuning

### 6.1.1 Dwarsdrager – turbineligger

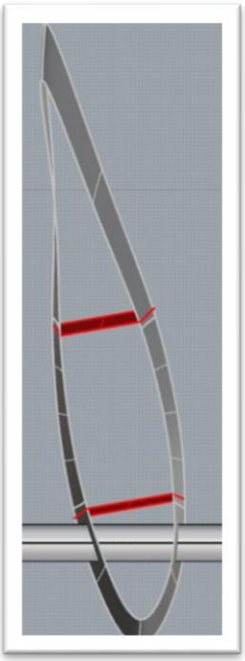
De verbinding tussen de dwarsdrager en de turbineligger is afhankelijk van de plaatsing van het brugdek in relatie tot de positie van de shearwebs en de onderzijde van het blad.



Figuur 17 - Doorsnede blad (l), connectie turbineligger – dwarsdrager (m), rampamoer (r)

In de rechtop staande (edgewise) oriëntatie zit het loopvlak van het dek op gelijke hoogte met de onderste van de twee shearwebs (fig. 17 rode kader). Een rechte kopplaat met een beugelwordt aan de turbineligger bevestigd. De dwarsdrager wordt uitgevoerd met een haak zodat de dwarsbalk aan de kopplaat kan worden opgehangen. Het gekromde vlak tussen turbineligger en kopplaat, hierboven weergegeven in groen, wordt uitgevuld met een nader te bepalen materiaal, bijv. kunsthars. Zo wordt voorkomen dat elke kopplaat op maat moet worden gemaakt. Voor de boutverbinding wordt als referentie uitgegaan van Rampamoeren, figuur 17. Deze zijn geschikt voor hollewand constructies van composiet.

In deze opzet worden de dwarsdragers niet momentvast aan de turbineligger bevestigd. De gekozen oplossing beperkt de krachten die in de turbineligger worden geïntroduceerd  De samengestelde brug kan ook als zodanig niet volledig off-site worden geproduceerd en in één keer naar de bouwlocatie worden gebracht. Dat is nodig omdat uit materiaaltesten (zie hst. 7) is gebleken dat hoewel de spar cap dik is, het vezelvolumepercentage relatief laag is. Daarbij is de vezelversterking sterk uni-directioneel van karakter. Een en ander resulteert in significante beperkingen voor wat betreft het pindraagvermogen voor boutverbindingen.

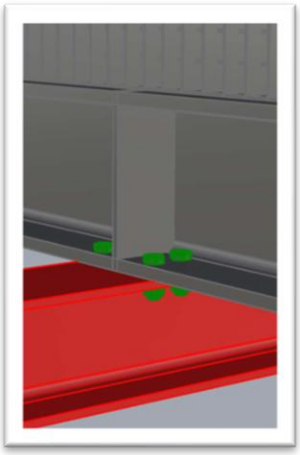


Figuur 18 - Balk in neus

Tijdens het VO ontwerpproces is tevens een bevestiging onderzocht waarbij de dwarsbalken door de neus van de turbineliggers gestoken zouden worden (fig. 18). Het lokale draagvermogen van het laminaat bleek onvoldoende te zijn voor deze oplossing.

### 6.1.2 Dwarsdrager – dek - leuning

De leuning wordt uitgelegd op een minimale hoogte van 1,0 m. Omdat de brug niet in een expliciete fietsroute ligt (wat niet wil zeggen dat er niet sporadisch fietsverkeer aanwezig is op de brug) is de leuninghoogte van 1,30 m niet aan de orde. De leuning wordt uitgelegd op een horizontale belasting van 1,0 kN/m, met een maximaal toegestane verplaatsing van 20 mm.



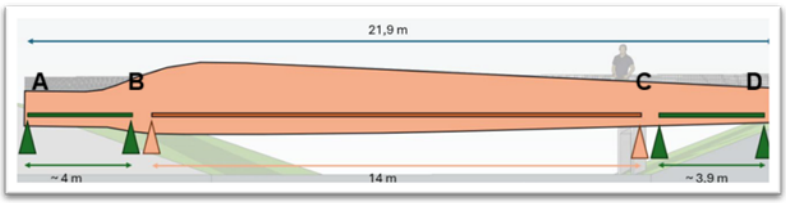
Figuur 19 - Verbinding dwarsbalk - leuning

De leuning bestaat uit twee delen. Het bovenste deel, een stalen persrooster wordt gelast op een U-vormige randbalk. De randbalk vormt tevens een schoprand voor het brugdek dat tussen de leuningen wordt geplaatst. Het brugdek is een doorgaande composiet sandwichplaat, afgesteund op de dwarsdragers. De krachten op de leuning worden, via de randbalk, eveneens overgedragen naar de dwarsdragers. In de onderflens van de randbalk worden 2x2 bouten voorzien t.b.v. de krachtsoverdracht naar de dwarsbalk (fig. 19).

## 6.2 Fundering

De brug kent vier steunpunten. De turbineligger steunt op B en C. Tussen B en C rust het loopdek op stalen dwarsbalken. Tussen A-B en C-D Is het loopdek zelfdragend over een lengte van maximaal 4 m (fig. 20). De brug wordt op palen gefundeerd. Om milieu-impact te beperken is onderzocht of de brug op houten palen kan worden gefundeerd. De draagkrachtige laag bevindt zich op ca. NAP-20 m. Op NAP-17 m bevindt zich een dunne zandlaag. Het inbrengen van de houten palen door de dunne zandlaag heen draagt het risico van paalbreuk met zich mee. Steunpunten B en C worden op stalen buispalen gefundeerd. De belasting op steunpunten A en D zijn significant lager. Deze steunpunten worden minder diep gefundeerd op houten palen met betonnen oplangers.

Qua belasting zouden steunpunten A en D op staal kunnen worden gefundeerd. Maar de verwachte zettingen over de levensduur bedragen 20-40 cm t.o.v. van de zettingsvrije steunpunten B en C. Dat heeft onwenselijke gevolgen voor het uiterlijk van de brug, omdat er dan duidelijk zichtbare scharnieren ontstaan bij B en C. Daarom moeten A en D ook zettingsvrij worden uitgevoerd.




Figuur 20 - Steunpunten Reefbrug

# 7 Testprotocol

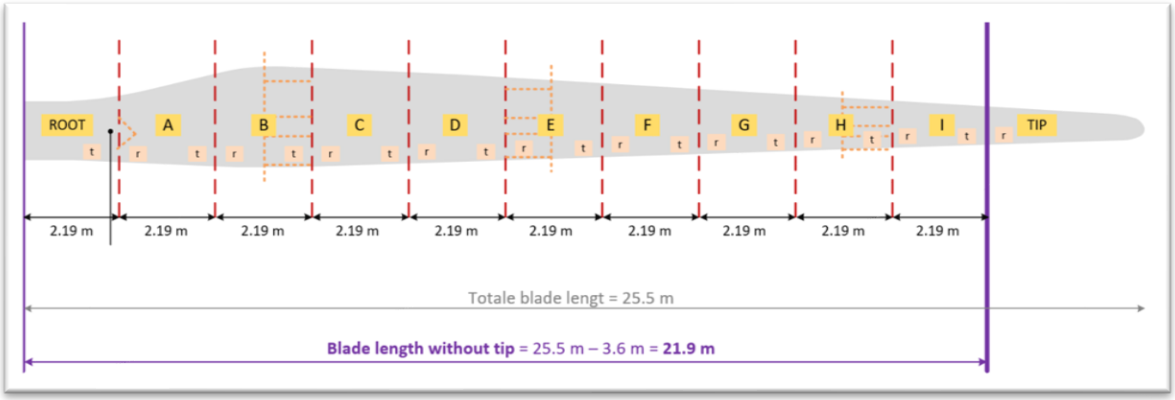
Conform het plan van aanpak van het project en de aanvullende bepalingen uit de SPUK-KCI subsidie worden uitgebreide materiaaltests uitgevoerd op de bladen. De kennis die daaruit volgt wordt gebruikt om het constructieve model van het blad op te stellen. Het helpt ook om in de toekomst sneller te bepalen of turbinebladen gebruikt kunnen worden als liggers. Dat is omdat de LM25.5 bladen die worden gebruikt representatief zijn voor een groot deel van de bladen dat de komende jaren vrijkomt. Die generatie bladen hebben allemaal ongeveer dezelfde lengte en zullen qua stijfheid en sterkte in zeker mate met elkaar overeen komen. De rapportage van de tests die voor de VO-fase zijn gedaan zijn opgenomen in drie delen in bijlage D.

## 7.1 Naamgevingsconventies



Figuur 21 – LM25.5 in segmenten gezaagd

Van de drie aangekochte bladen is er één in 11 segmenten gezaagd (fig. 21, 22). De segmenten zijn ingemeten als input voor het constructieve model en het tekenmodel. Segmenten B, E en H, zoals hieronder weergegeven worden verder in panelen gezaagd ten behoeve van materiaaltests. Hierbij is speciale aandacht besteed aan het vastleggen van de oriëntatie van elk paneel, omdat de vezeloriëntatie in het laminaat niet in alle richtingen gelijk is.




Figuur 22 – Segmentennummering en zaagsnedes

De verschillende panelen (fig. 23) binnen een segment worden onderling ook onderscheiden.




Figuur 23 – Panelen genomen uit een segment

Hierin geldt:

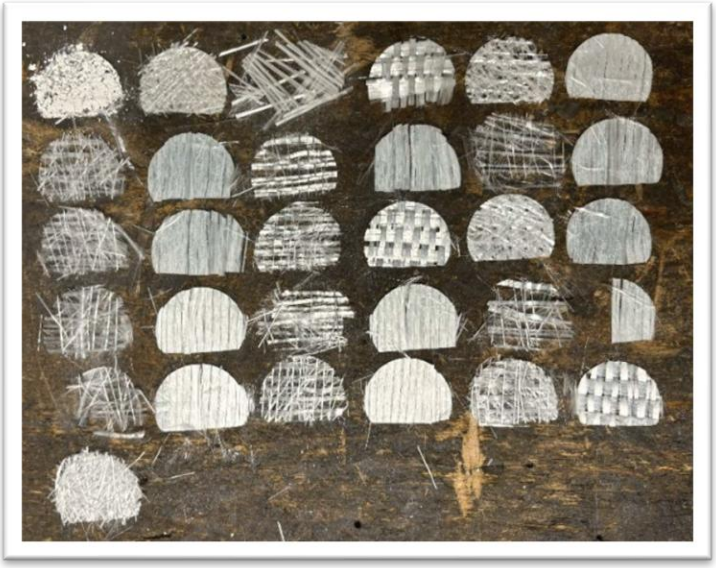
- LP = Leading Edge Panel
- SWL = Shear Web Left
- SC = Spar Cap
- SWR = Shear Web Right
- TP = Trailing Edge Panel
- TE = Trailing Edge
-

In blauw, met de letters “P” and “S”, wordt onderscheid gemaakt tussen de zijde die onder luchtdruk staat en de zijde die onder zuiging staat. De letters “r” en “t” geven aan of de snede aan de kant van de root-zijde of de tip-zijde zit.

## 7.2 Burn-off tests

Om de opbouw van een gebruikt windturbineblad te onderzoeken, dat voornamelijk is gemaakt van glasvezelversterkt polymeer (GFRP) composiet, werden 26 schijven uitgezaagd waarop verbrandingstesten (burn-off tests) zijn uitgevoerd. Deze verbrandingstests geven inzicht in de materiaalsamenstelling van verschillende delen van het blad door de stapelvolgorde van de weefsels en de vezelvolumefracties te analyseren (fig. 24).

De verbrandingstesten tonen consistentie in de vezelopbouw en het vezelvolumepercentage tussen panelen van de zuig- en drukzijde van het blad. De testen tonen ook consistentie in de vezelopbouw en het vezelvolumepercentage tussen dezelfde paneeltypen uit verschillende segmenten, bijvoorbeeld voor de voorrandpanelen van segment B en E. Er werden echter lichte afwijkingen in de vezelopbouw gevonden richting het worteleinde (segment A) en het tipeinde van het blad (segment H).



Figuur 24 – lay-up vezelmatten na burn off test uit één schijf

De vezelvolumefractie voor elk specimen werd berekend op basis van een aangenomen dichtheid voor de hars en glasvezel. Om deze aangenomen dichtheden te verifiëren, werd hydrostatische weging uitgevoerd op drie spar cap proefstukken. De spar caps, die voornamelijk uit UD-vezels bestonden, bleken vezelvolumefracties te hebben tussen 0,35 en 0,41, wat aan de lage kant is. Bij nadere inspectie van de specimens was te zien dat elke UD-bundel omgeven is door een dunne harslaag, wat bevestigt dat het materiaal harsrijk is. De bladpanelen daarentegen bleken vrij dik te zijn, met uitgebrande specimens tot 28 mm dik, wat betekent dat het paneel als geheel nog steeds een grote hoeveelheid glasvezel bevat.

Over het geheel genomen kan worden geconcludeerd dat er veel consistenties werden gevonden in zowel de lay-up als de vezelvolumefracties, wat een solide basis vormt voor het reconstrueren van een constructief EEM bladmodel om deze windturbinebladen uiteindelijk te hergebruiken als hoofdliggers van bruggen.

## 7.3 Coupontests

Als vooronderzoek naar de materiaaleigenschappen van een gebruikt windturbineblad, glasvezelversterkte polymeer (GFRP), worden composietcoupons uit twee delen van het blad gehaald die vervolgens op trek of compressie werden getest. Dit geeft een eerste inzicht in de resterende sterkte, stijfheid en rek bij bezwijken van het materiaal, wat nodig is als input voor de constructieve modellering van de bladen bij ontwerpen op hergebruik als brugliggers.

Er is voor gekozen om de coupons zo op te stellen dat deze óf alleen een combinatie bevatten CSM, +45/-45 en 0/90 lamellen (“multidirectionele” coupons) of alleen een overwegend unidirectionele lagen (“unidirectionele” coupons). Dit geeft inzicht in de individuele materiaaleigenschappen die later gecombineerd worden in één constructief model van het blad en zijn panelen, met de juiste dikte verhoudingen.

Uit de trekproeven blijkt dat het materiaal een grote sterkte en stijfheid heeft, met een treksterkte van UD-coupons met een gemiddelde tot 455 MPa en een stijfheid tot gemiddeld 31 GPa.

De spreiding binnen de resultaten voor de eigenschappen van de trekproeven bleken gemiddeld rond de 9% te liggen, met een maximum van 12%. Het is waarschijnlijk dat de omvang van de spreiding verband houdt met meer dan alleen variaties in materiaaleigenschappen. Kleine verschillen in couponsamenstelling, kleine variaties in vezeluitlijning en variaties in oppervlak ruwheid hebben waarschijnlijk de resultaten beïnvloed (fig. 25).



Figuur 25 – Coupon voor trektest

Ook de compressietests wijzen op aanzienlijke sterkte en stijfheid, alhoewel de sterkte iets minder is dan die gevonden in de trekproeven. De stijfheid van de UD-coupons bedraagt gemiddeld 30 GPa, vergelijkbaar met die van de trekproeven, terwijl de hoogste gevonden sterkte-eigenschap gemiddeld 399 MPa bedraagt. De spreiding in de resultaten bij de drukproeven bleek groter dan die bij de trekproeven, met een spreiding tot 23%. De grotere spreiding voor de multi-directionele coupons zou kunnen worden verklaard door de asymmetrie in de couponsamenstelling. Ook de compressiecoupons lijken kwetsbaarder voor onvolkomenheden, die voortkomen uit de voorbereiding van de coupon, dan de spanningscoupons (fig. 26).



Figuur 26 – Coupon voor compressietest

Over het geheel genomen laten de testresultaten zien dat de geteste delen van het windturbineblad nog steeds een aanzienlijke sterkte en stijfheid hebben, waardoor verdere ontwikkeling van het brugontwerp mogelijk is. In de volgende ontwerpfase er zullen meer coupons worden getest, van andere delen van het blad, maar ook in de loodrechte richting. Dit geeft een vollediger inzicht in de materiaaleigenschappen van het blad. Dit is onder meer zinvol voor het bepalen van puntdraagkracht zoals bij boutverbindingen, bijvoorbeeld met de dwarsdragers.

Geplande verbeteringen aan de testmethode voor de volgende testfase omvatten de invoering van een nog strengere kwaliteitscontrole bij de voorbereiding van de proefstukken (coupons), met bijzondere aandacht voor de consistentie van het aantal weefsellagen per proefstuk en de vlakheid van de proefstukken. Tijdens het testen zal de bevestiging van de extensometer aan het proefstuk worden verbeterd, zodat de rek bij breuk kan worden gemeten. Daarnaast zullen voor de DIC-metingen (Digital Image Correlation), indien haalbaar, foto's met een korter tijdsinterval worden gemaakt om meer meetpunten te verkrijgen.

# 8 DO-fase

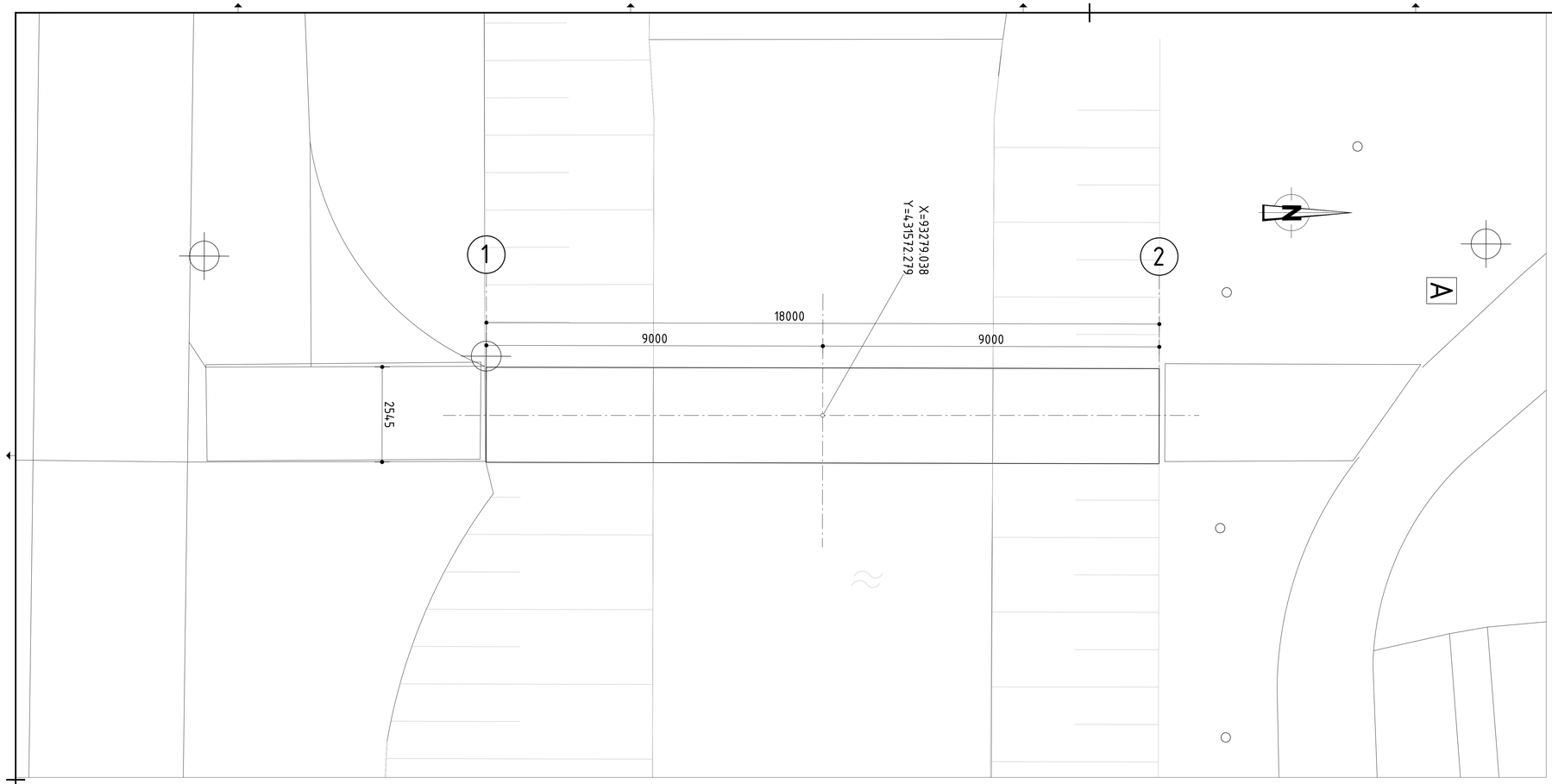
## 8.1 Aandachtspunten DO-fase

- Randprofiel leuning kijken of een alternatief UPE-profiel kan voldoen
- Sterkte randprofiel tpv de 4m aanbruggen
- Voorstellen optimalisatie van Marc betreffende kopplaat op turbineligger t.b.v. verankering dwarsligger
- Opleggingen turbineligger
    - Uitwerking fixatie ROOT ligger op landhoofd stramien 1
- Paalfundering
    - In DO afweging maken voor alle houten palen als er meer palen per steunpunt worden toegepast
    - In DO afwegen om overstekken alsnog te laten afdragen op de turbineligger
        - Incl. stootplaten
- Hoe om te gaan met proefbelasting i.r.t. faalmechanisme als we gaan testen op locatie.
- Verloop shearwebs richting TIP beter modelleren.
- Doorrijdbeveiliging bepalen.
- Kleurstelling brug en turbineliggers bepalen.
- In het VO is voorzien om voor het brugdek een sandwich composietplaat te gebruiken. Bij het ramen van de kosten bleek dat deze oplossing te duur is. De productiekosten van een composiet lopen niet evenredig terug met de hoogte van het dek, waardoor een dun sandwichdek als brugdek niet veel goedkoper is dan een zelfdragende sandwich plaat zoals Fibercore die produceert. Daarom wordt voorgesorteerd op een massieve plaat als dek over de stalen liggers heen. De zij-overspanningen bestaan nog wel uit dunne sandwichplaten. Dit wordt in het DO verder verwerkt.

# 9 Bijlagen

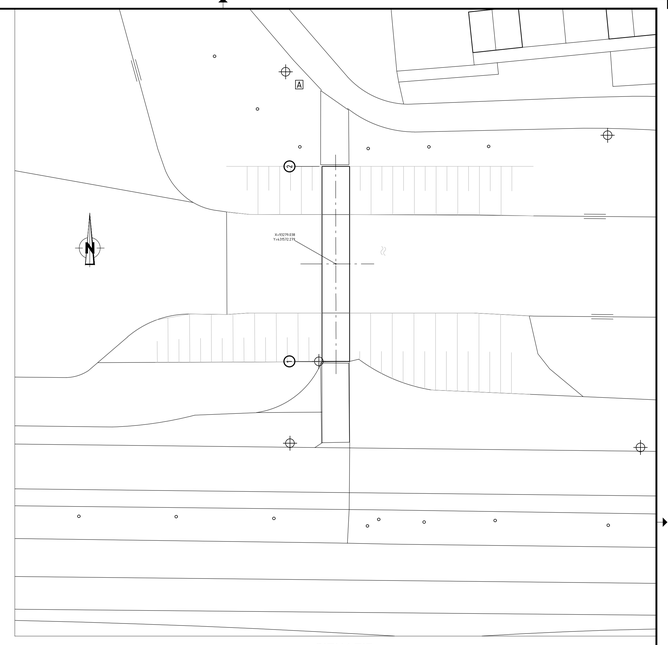
A. VO-tekeningen Reefbrug
B. Uitgangspuntenrapport
C. VO-berekeningsrapport
D. Rapporten materiaaltests
E. Checklist

# Bijlage A – VO-tekeningen Reefbrug



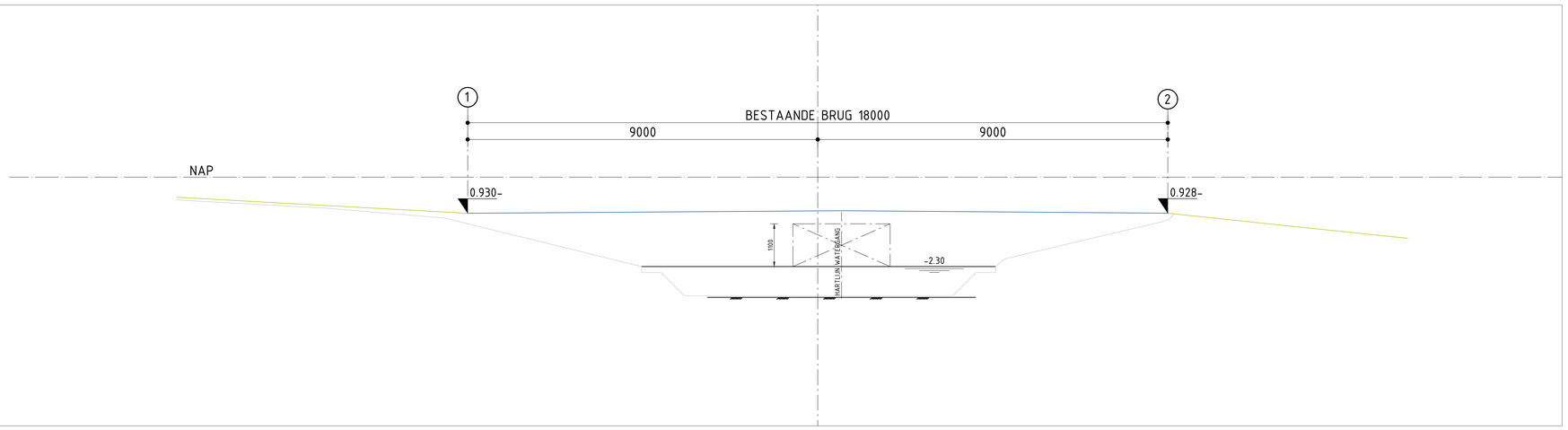

BOVENAANZICHT BESTAANDE BRUG

SCHAAL 1 : 50




SITUATIE

SCHAAL 1 : 200



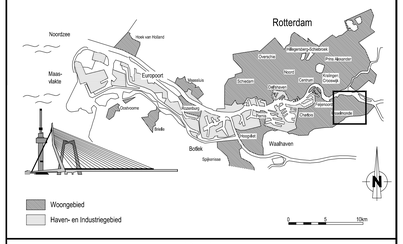

PROFIEL BESTAANDE BRUG

SCHAAL 1 : 50

## Opmerkingen

- Maten in millimeters, tenzij anders vermeld
- Peilmaten in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld

## Situatie




## Versie

| | | | |
|---|---|---|---|
| f | | | |
| e | | | |
| d | | | |
| c | | | |
| b | | | |
| a | VOORLOPIG ONTWERP | TKR | 10-08-2026 |
| Versie | Omschrijving | Tekenaar | Datum |
| Bestandsnaam: VI001c.dwg | Projectcode: | Verwijzing: | |


Gemeente Rotterdam

Stadsontwikkeling
Bureau Management en Engineering
Ir. Rotterdam
Wilhelminakade 179
Postbus 6075 3002 AN Rotterdam
www.rotterdam.nl/ingenieursbureau
Telefoon:
E-mail:


# REEFBRUG

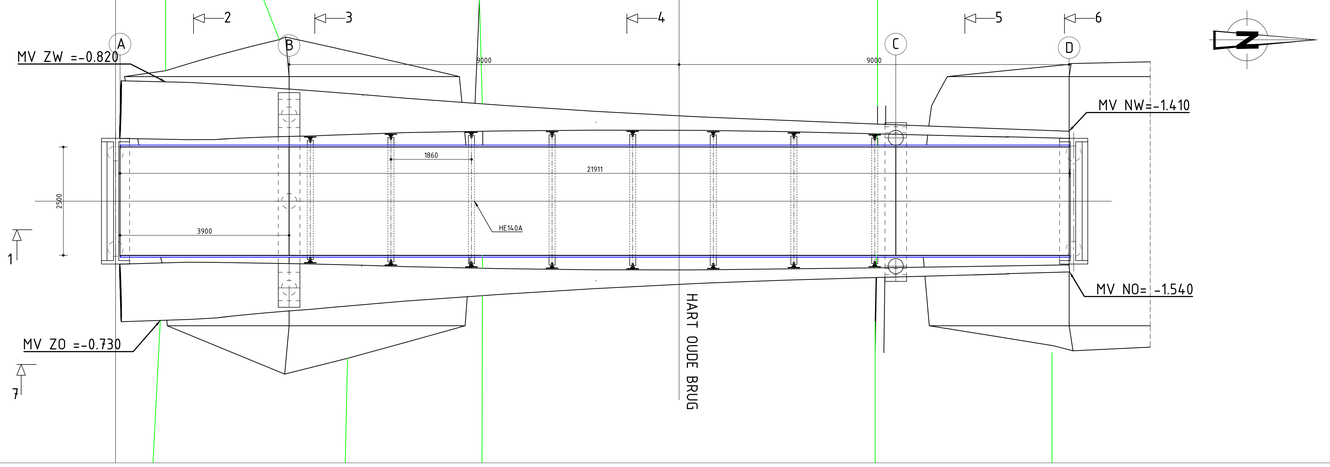
## BESTAANDE SITUATIE

VOORLOPIG ONTWERP

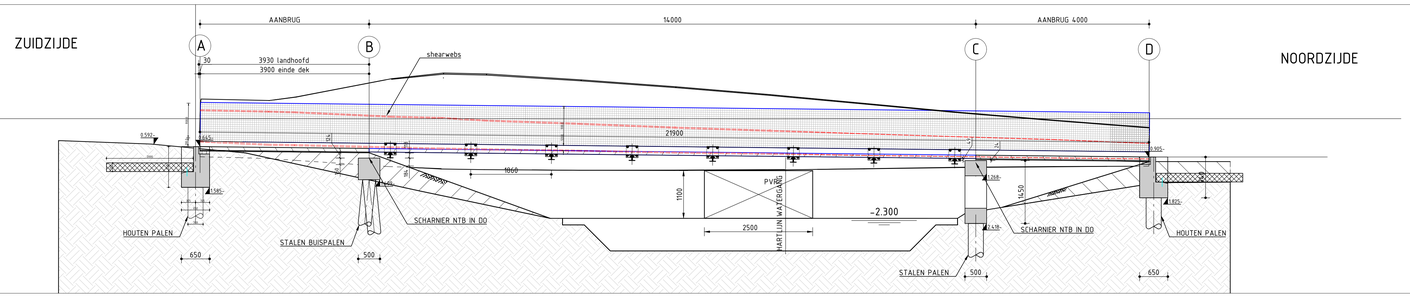
| | | | |
|---|---|---|---|
| Behoort bij: | Nummer: | Documentsoort: | Tekening |
| Geografische code: | | | |
| Formaat: | A0 | Blad | 1 van 1 bladen |
| Schaal: | | | |

| Getekend: | Gecontroleerd: | Geautoriseerd: | Tekeningnummer: | |
|---|---|---|---|---|
| TKR | W.D. SCHUTTE | J. v.d. LAARSE | IB-2025-0505-VT001 | c |
| Paraaf | Paraaf/Datum | Paraaf/Datum | Wijk/Projectcode + Soort + Volgnummer | Versie |

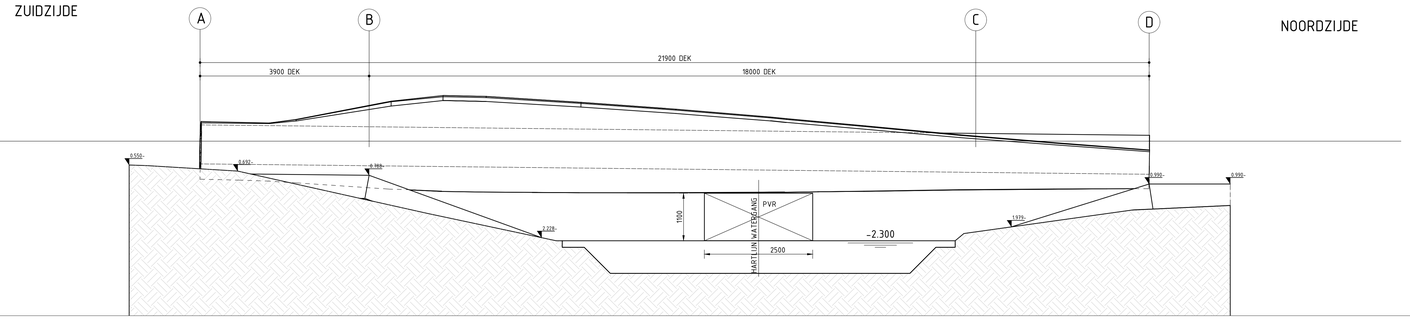
\\ROTTERDAM.LOCAL\PROCESDATA\BOIB-DOSSIERS\2025\IB-2025-0505 VERVANGING PONS REEFBRUG MET COMPOSIET WINKOLENBLADEN\BIM\ACAD\VO



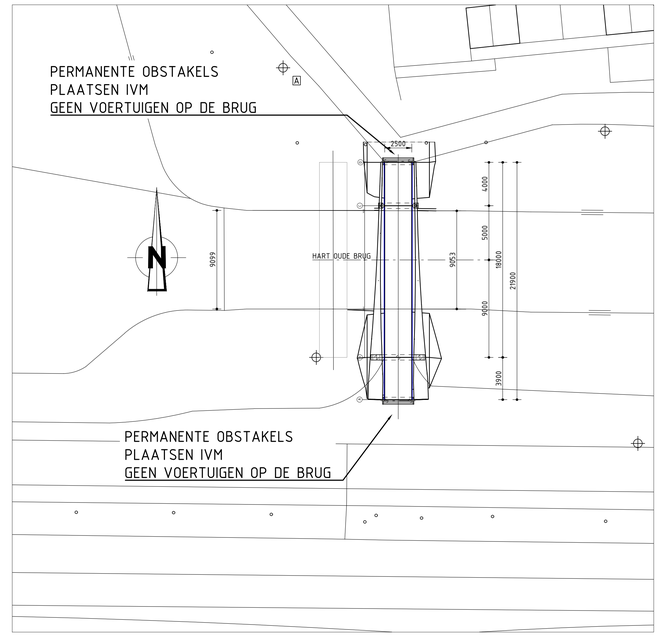

BOVENAANZICHT
SCHAAL 1 : 50



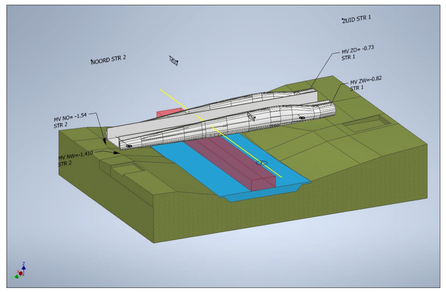

DOORSNEDE 1
SCHAAL 1 : 50

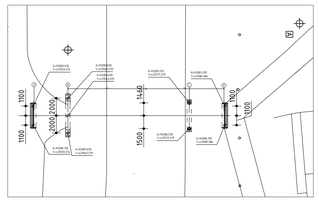



AANZICHT 7
SCHAAL 1 : 50




SITUATIE
SCHAAL 1 : 200




PALENPLAN ntb in DO
SCHAAL 1 : 250

| Steunpunt | Sondering | Aantal palen | Paaltype | Afmeting | Paalbelasting | PPN |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | [mm] | [kN] | [mNAP] |
| A | S2 | 2 | Houten paal (H1) | 200 | 64 | -18 |
| B | S2 | 3 | Stalen buispaal met gesloten voet (S1) | 219 | 174 | -20 |
| C | S1 | 2 | S1 | 219 | 213 | -21.5 |
| D | S1 | 2 | H1 | 200 | 64 | -19.5 |

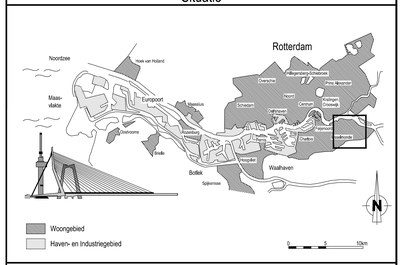
## MATERIALEN

- Turbineliggers VVK (tweedehands)
- Dek VVK sandwichplaat
- Dwarsliggers staal S355
- Leuning staal S235
- Steunpunten beton C35/45
- Funderingspalen zie tabel

## Opmerkingen

- Maten in millimeters, tenzij anders vermeld
- Peilmaten in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld

## Situatie




## Versie

| | | | |
|---|---|---|---|
| f | | | |
| e | | | |
| d | | | |
| c | | | |
| b | | | |
| a | VOORLOPIG ONTWERP | TKR | 10-08-2026 |
| Versie | Omschrijving | Tekenaar | Datum |
| Bestandsnaam: V002 Ne St.dwg | Projectcode: | Verwijzing: | |

Gemeente Rotterdam
Stadsontwikkeling
Projectmanagement en Engineering
Rijnhaven
Postbus 6575 3002 AN Rotterdam
www.rotterdam.nl/ingenieursbureau
Telefoon:
E-mail:

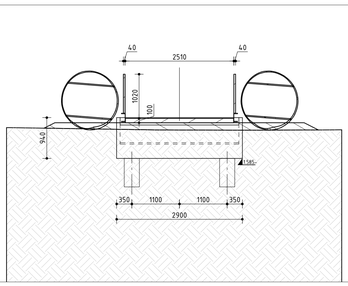
# REEFBRUG

## LANGS EN DWARS DRSN
WINDBLADEN TYPE NM52-900

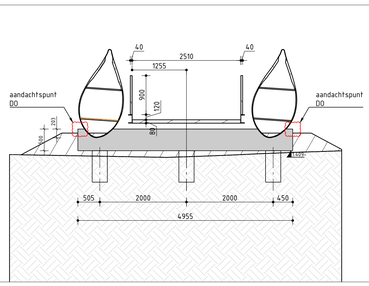
VOOLOPIG ONTWERP

| | | | |
|---|---|---|---|
| Getekend: T. KROOS | Gecontroleerd: W.D. SCHUTTE | Geautoriseerd: J. v.d. LAARSE | Tekeningnummer: IB-2025-0505-VT002 |
| Parraf | Parraf/Datum | Parraf/Datum | Wijk/Projectcode - Soort - Volgnummer |

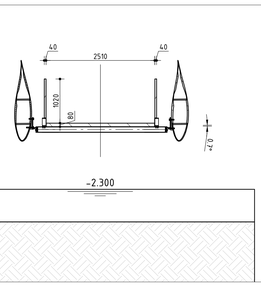
Behoort bij: Nummer: Documentsoort: Tekening
Geografische code:
Formaat: A0 Blad 1 van 1
Schaal: 1 bladen
a Versie



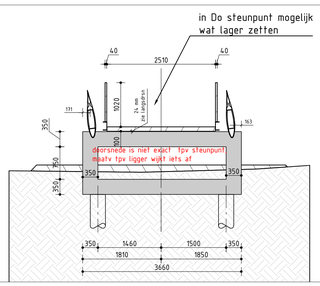

DOORSNEDE 2
SCHAAL 1 : 50



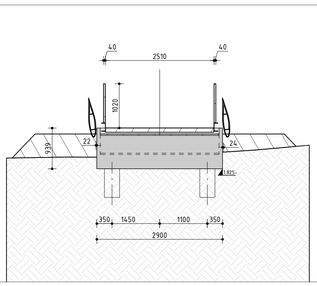

DOORSNEDE 3
SCHAAL 1 : 50



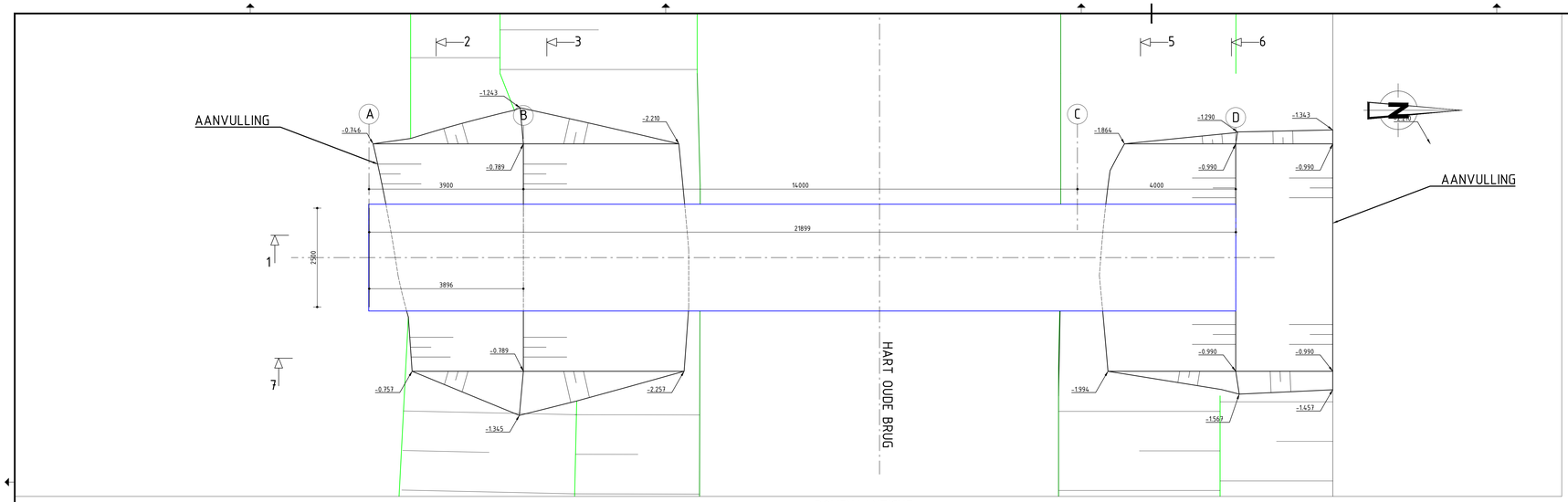

DOORSNEDE 4
SCHAAL 1 : 50



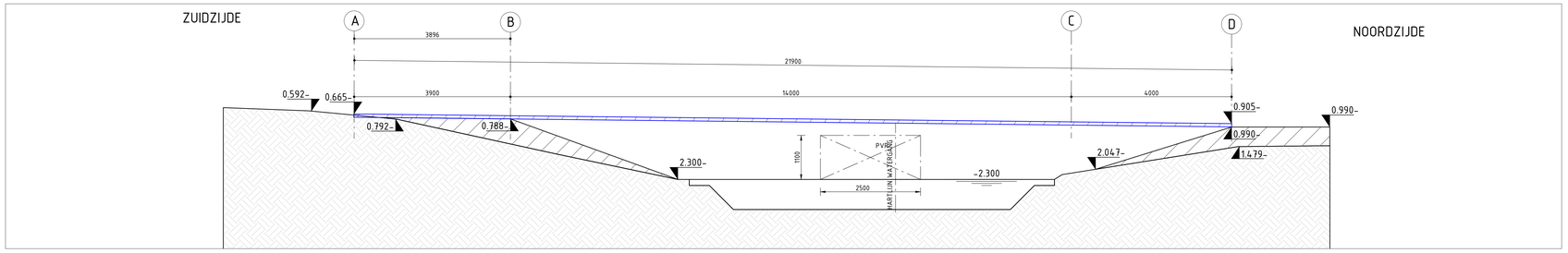

DOORSNEDE 5
SCHAAL 1 : 50



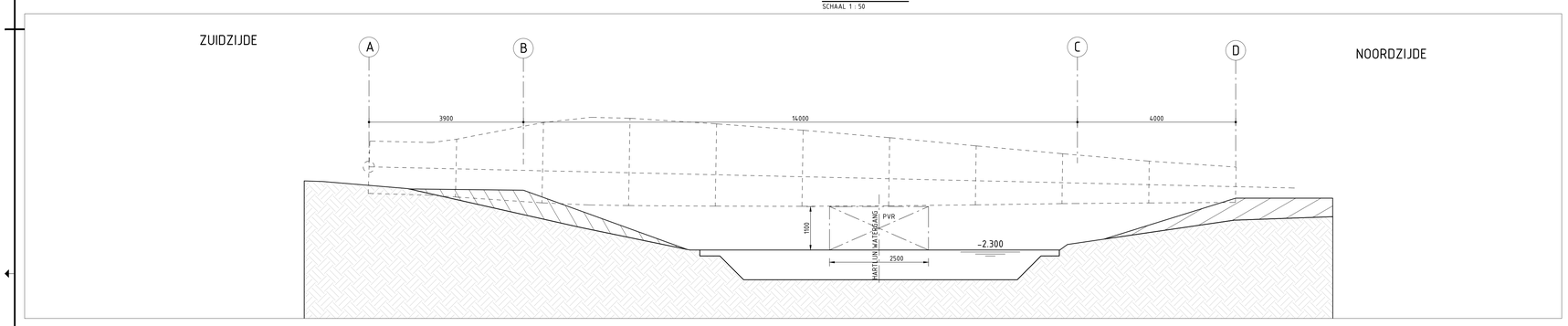

DOORSNEDE 6
SCHAAL 1 : 50



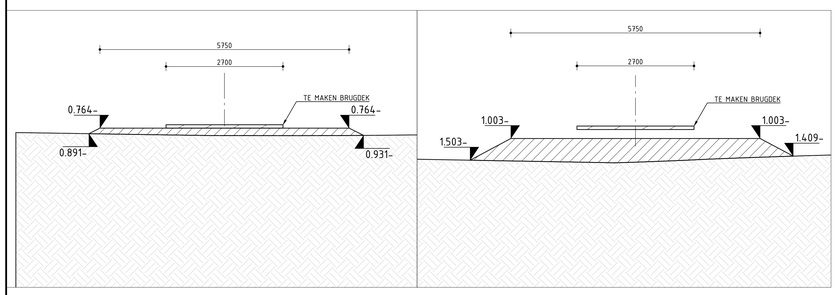

BOVENAANZICHT
SCHAAL 1 : 50




DOORSNEDE 1
SCHAAL 1 : 50




AANZICHT 7
SCHAAL 1 : 50

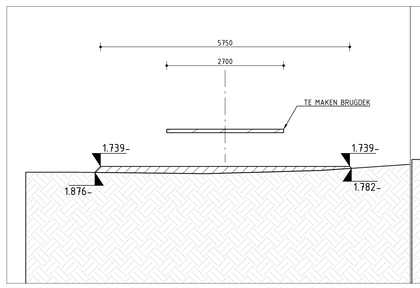



DOORSNEDE 2
SCHAAL 1 : 50

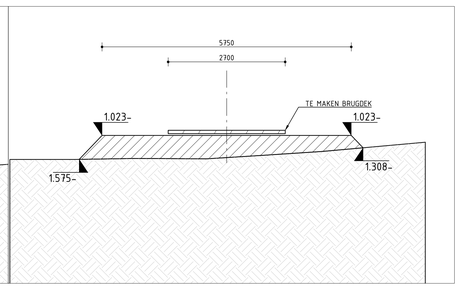



DOORSNEDE 3
SCHAAL 1 : 50

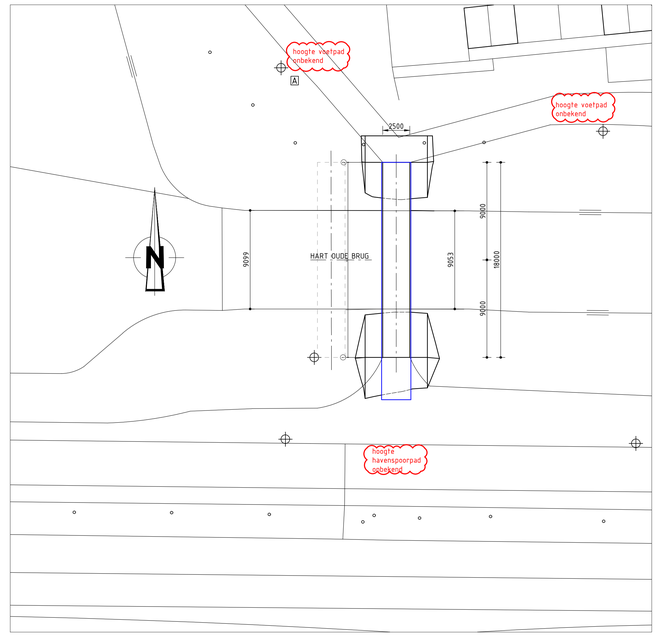
DOORSNEDE 4 vervallen



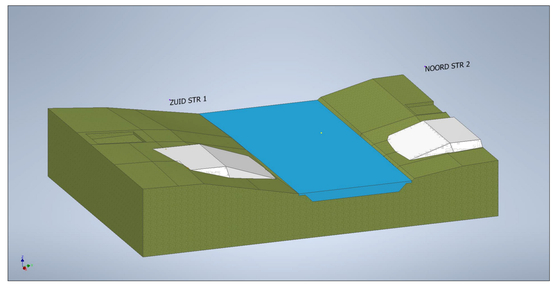

DOORSNEDE 5
SCHAAL 1 : 50




DOORSNEDE 6
SCHAAL 1 : 50




SITUATIE
SCHAAL 1 : 50

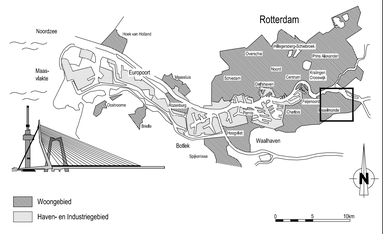



3D VIEW

## Opmerkingen

- Maten in millimeters, tenzij anders vermeld
- Peilmaten in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld

## Situatie




## Versie

| | | | |
|---|---|---|---|
| f | | | |
| e | | | |
| d | | | |
| c | | | |
| b | | | |
| a | VOORLOPIG ONTWERP | TKR | 10-08-2026 |
| Versie | Omschrijving | Tekenaar | Datum |
| Bestandsnaam: V003 Grondwerk.dwg | Projectcode: | Verwijzing: | |

Gemeente Rotterdam
Stadsontwikkeling
Projectmanagement en Engineering
Wilhelminakade 179
Postbus 6575 3002 AN Rotterdam
www.rotterdam.nl/ingenieursbureau
Telefoon:
E-mail:

# REEFBRUG

## GRONDWERK

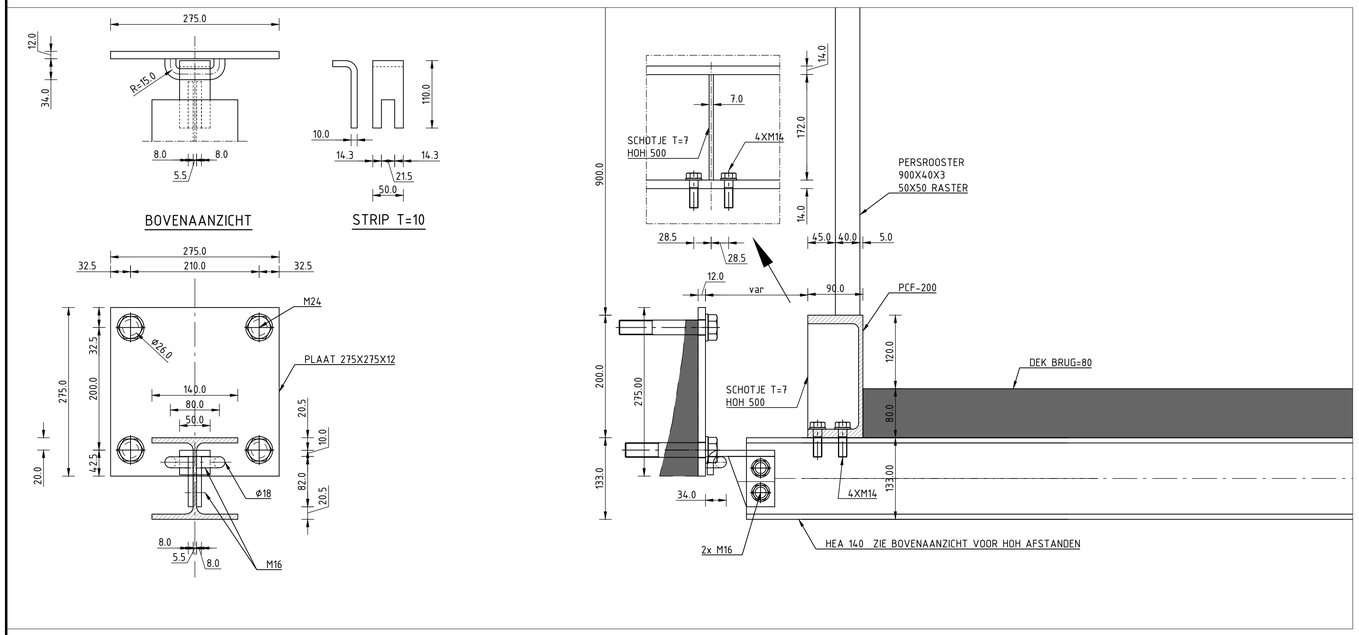
WINDBLADEN TYPE NM52-900

VOORLOPIG ONTWERP

| | | | |
|---|---|---|---|
| Behoort bij: | Nummer: | Documentsoort: | Tekening |
| Geografische ordе: | | | |
| Formaat: | A0 | Blad | 1 van |
| Schaal: | | | 1 bladen |

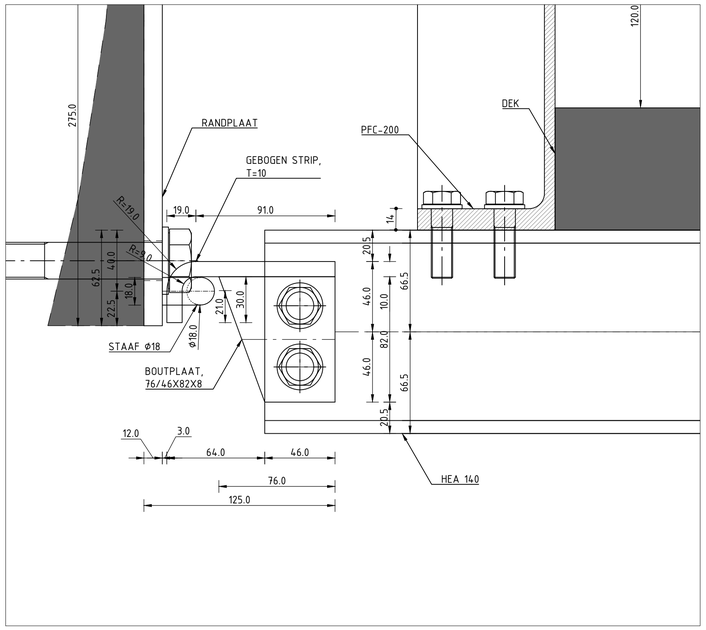
| Getekend | Gecontroleerd | Gevisumeerd | Tekeningnummer | |
|---|---|---|---|---|
| T.KROOS | W.D. SCHUTTE | J. vd LAARSE | IB-2025-0505-VT003 | a |
| Parraaf | Parraaf/Datum | Parraaf/Datum | Wbk/Projectcode - Soort - Volgnummer | Versie |

I:\ROTTERDAM\LOCAL\PROCESDATA\SCHUD\DOSSIERS\2025\IB-2025-0505 VERVANGING PO65 REEFBRUG MET COMPOSIET WINDMOLENBLADEN\BIM\ACAD\VO




## RAND DETAIL BRUGDEK (STR1-STR 3)

SCHAAL 1 : 5




## DETAIL BOUTPLAAT

SCHAAL 1 : 2



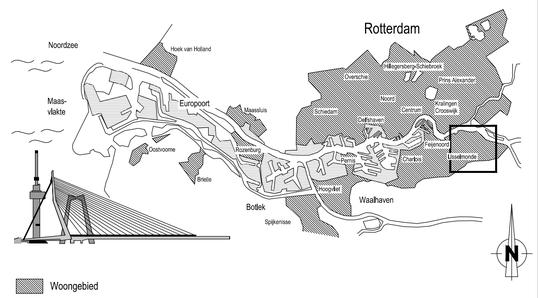

## RAND DETAIL AANBRUGGEN

SCHAAL 1 : 5

## Opmerkingen

- Maten in millimeters, tenzij anders vermeld
- Peilmaten in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld

## Situatie




## Versie

| | | | |
|---|---|---|---|
| f | | | |
| e | | | |
| d | | | |
| c | | | |
| b | | | |
| a | VOORLOPIG ONTWERP | TKR | 10-08-2026 |
| Versie | Omschrijving | Tekenaar | Datum |

Bestandsnaam: Vt002 Nw Sit.dwg | Projectcode: | Verwijzing:

Gemeente Rotterdam
Stadsontwikkeling
Projectmanagement en Engineering
de Rotterdam
Wilhelminakade 179
Postbus 6575 3002 AN Rotterdam
www.rotterdam.nl/ingenieursbureau
Telefoon:
—
E-mail:
—

# REEFBRUG

## DETAILS
WINDBLADEN TYPE NM52-900

VOOLOPIG ONTWERP

| | | | |
|---|---|---|---|
| Behoort bij: | Nummer: | Documentsoort: | Tekening |
| Geografische code: | | | |
| Formaat: | A0 | Blad 1 van | |
| Schaal: | | 1 bladen | |

| Getekend: | Gecontroleerd: | Geautoriseerd: | Tekeningnummer: |
|---|---|---|---|
| T. KROOS | W.D. SCHUTTE | J. v.d. LAARSE | VT004 a |
| Paraaf | Paraaf/Datum | Paraaf/Datum | Wijk/Projectcode - Soort - Volgnummer / Versie |

# Bijlage B – Uitgangspuntenrapport

RAPPORT

# Uitgangspunten VO Reefbrug

Uitgangspuntenrapport voor VO vervanging Reefbrug

| | |
|---|---|
| Klant: | Gemeente Rotterdam, W.D. Schutte |
| Referentie: | BJ7949-HAS-XX-XX-RP-C-0004 |
| Status: | S5/P02.01 |
| Datum: | 6 juli 2026 |

Haskoning
Enhancing Society Together

**HASKONING NEDERLAND B.V.**

Mijnbouwstraat 120
2628 RX Delft
Netherlands
Mobility & Infrastructure
Trade register number: 56515154

E-mail: info@haskoning.com
Website: haskoning.com

| | |
|---|---|
| Titel document: | Uitgangspunten VO Reefbrug |
| Ondertitel: | Uitgangspuntenrapport voor VO vervanging Reefbrug |
| Referentie: | BJ7949-HAS-XX-XX-RP-C-0004 |
| Uw kenmerk: | |
| Status: | S5/P02.01 |
| Datum: | 6 juli 2026 |
| Projectnaam: | Reefbrug |
| Projectnummer: | BJ7949 |
| Auteur(s): | Coen Cosijn, Liesbeth Tromp |
| Opgesteld door: | Coen Cosijn |
| Gecontroleerd door: | Liesbeth Tromp |
| Datum: | 6 Juli 2026 |
| Goedgekeurd door: | Liesbeth Tromp |
| Datum: | 6 Juli 2026 |
| Classificatie: | Projectgerelateerd |

*Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. Haskoning Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.*

*Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van Haskoning Nederland B.V. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat. Dit document kan zijn opgesteld met behulp van kunstmatige intelligentie (AI); alle door AI gegenereerde inhoud is beoordeeld en gevalideerd door onze experts.*

# Inhoud


| | | |
|---|---|---|
| **1** | **Introductie** | **1** |
| 1.1 | Projectomschrijving | 1 |
| 1.1.1 | Overzicht VO | 1 |
| 1.1.2 | Constructief principe | 2 |
| 1.2 | Doel en scope | 2 |
| 1.3 | Kwaliteitsborging | 2 |
| **2** | **Documenten, normen en richtlijnen** | **3** |
| 2.1 | Beschikbare informatie | 3 |
| 2.2 | Normen en Richtlijnen | 3 |
| **3** | **Randvoorwaarden en uitgangspunten** | **5** |
| 3.1 | Voorwaarden aan vormgeving | 5 |
| 3.1.1 | Afmetingen | 5 |
| 3.1.2 | Helling | 5 |
| 3.1.3 | Zeeg & Toog | 5 |
| 3.2 | Ontwerp levensduur en betrouwbaarheid | 5 |
| 3.3 | Materiaaleigenschappen | 6 |
| 3.4 | Belastingen | 6 |
| 3.4.1 | Gelijkmatig verdeelde belasting | 6 |
| 3.4.2 | Bijkomende horizontale belasting | 7 |
| 3.4.3 | Geconcentreerde belasting | 7 |
| 3.4.4 | Voertuigen | 7 |
| 3.4.5 | Belasting op leuningen | 7 |
| 3.4.6 | Windbelasting | 7 |
| 3.4.7 | Sneeuwbelasting | 8 |
| 3.4.8 | Temperatuurbelasting | 8 |
| 3.4.8.1 | Gelijkmatige temperatuur component | 8 |
| 3.4.8.2 | Verticale lineaire temperatuur component | 8 |
| 3.4.8.3 | Uitzetting voegen | 9 |
| 3.4.9 | Belasting combinaties | 9 |
| 3.5 | Uiterste grenstoestand eisen | 10 |
| 3.5.1 | Globale UGT toetsen | 10 |
| 3.5.2 | Lokale UGT toetsen | 10 |
| 3.6 | Bruikbaarheids-grenstoestand eisen | 10 |
| 3.6.1 | Doorbuigingseisen | 10 |
| 3.6.2 | Trilling/comfort | 10 |
| 3.6.3 | Vervorming leuning | 11 |
| 3.7 | Werkwijze constructieve bepalingen | 11 |

## Tabellen

Tabel 2-1: Relevante documenten voor VO Reefbrug 3
Tabel 2-2: Normenlijst en Richtlijnen 3
Tabel 3-1: Classificaties Reefbrug 6
Tabel 3-2: Materiaaleigenschappen Reefbrug 6
Tabel 3-3: Belasting factoren CC1 constructie 9
Tabel 3-4: Partiele factoren fiets- en voetgangersbrug 9
Tabel 3-5: Combinatie regels voor belastingen op fiets- en voetgangersbruggen 10
Tabel 3-6: Overzicht uit te voeren toetsingen VO Reefbrug 12

## Figuren

Figuur 1-1: Huidige Reefbrug 1
Figuur 1-2: Schetsontwerp als basis van VO 1
Figuur 1-3: Schematischte mechanisch systeem VO Reefbrug 2

# 1 Introductie

## 1.1 Projectomschrijving

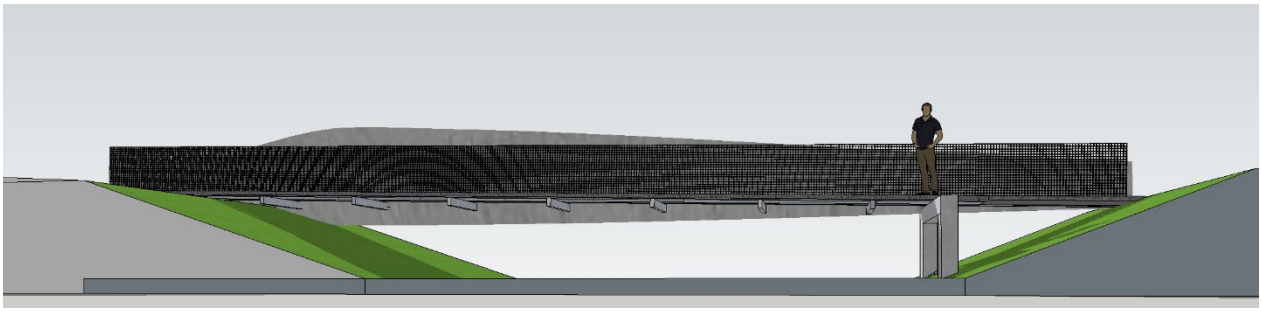
De Gemeente Rotterdam heeft een vervangingsopgave voor de Reefbrug, liggende in Rotterdam zuid. De Reefbrug is een fiets- en voetgangersbrug die de woonwijk Zuidwijk met het Havenspoorpad verbindt. De huidige brug is een houten brug die aan vervangen toe is. Zie Figuur 1-1 voor een zijaanzicht van de huidige Reefbrug.



*Figuur 1-1: Huidige Reefbrug*

### 1.1.1 Overzicht VO

Ter vervanging van de Reefbrug heeft de Gemeente Rotterdam de ambitie om een circulaire brug op dezelfde plek te plaatsen. Hierbij is de keuze gevallen op een hoofddraagconstructie die bestaat uit oude windturbinebladen. In een vooronderzoek zijn enkele configuraties bekeken en in hoofdlijnen met elkaar vergeleken. In de VO-fase wordt er verder onderzoek gedaan naar onderzochte configuraties. Aan de hand van de onderzochte varianten is een ontwerp gekozen waar het meeste vertrouwen in is. In Figuur 1-2 is deze geselecteerde configuratie weergegeven, zie ook [R1]. Hierbij wordt het blad aan weerszijde simpel opgelegd, met losse aanbruggen van begin ligger tot oplegging. Het blad draagt dus enkel het dek tussen de opleggingen.



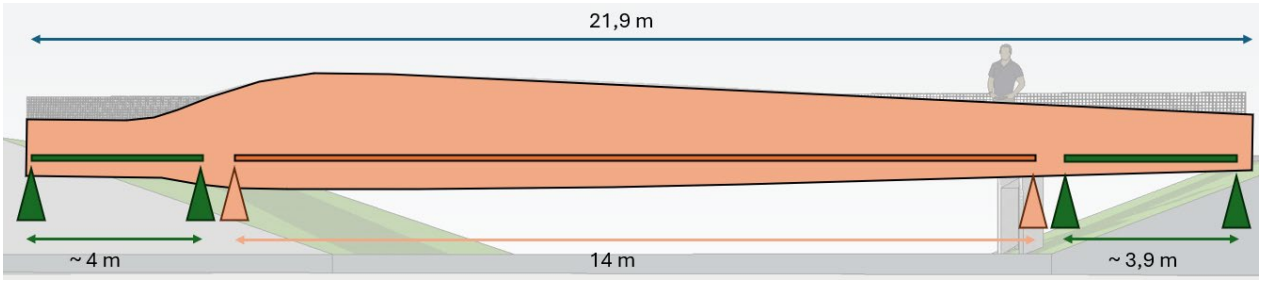
*Figuur 1-2: Schetsontwerp als basis van VO*

### 1.1.2 Constructief principe

De brug bestaat uit twee naast elkaar gelegen end-of-use windturbinebladen als primaire draagconstructie met daartussen een dek. De afmetingen van de hoofdoverspanning bedragen c.a. 14m x 2.5m (L x B). Het totale dek zal ongeveer 21.9 meter lang zijn, de windmolen bladen zonder tip zijn ongeveer even lang. Hierover verder meer in hoofdstuk 3.1.

De windturbine bladen zullen op 2 punten rotatievrijworden ondersteund. De ondersteuningen zullen worden ontworpen in de vorm van een zadel aan de onderzijde van het blad. De bestaande landhoofden dienen hiervoor vervangen te worden en de tussensteunpunten verwijderd.

In Figuur 1-3 is het oplegsysteem van het VO geschematiseerd. Het windturbine blad is in licht oranje weergegeven en wordt rotatievrij opgelegd aan weerszijden van de overspanning. Het dek tussen deze opleggingen is in donkerder oranje weergegeven en zal afdragen op de bladen. Vanaf het landhoofd tot aan de opleggingen zal aan beide zijden een aanbrug worden toegepast, weergegeven in groen. Deze aanbruggen zullen op zichzelf dragende constructies zijn, die (vrijwel) niet afdragen op de bladen, maar ondersteund zijn op de steunpunten en de landhoofden.




*Figuur 1-3: Schematischte mechanisch systeem VO Reefbrug*

## 1.2 Doel en scope

Het doel van dit document is het inzichtelijk maken van de uitgangpunten met betrekking tot het VO voor de vervangende Reefbrug. Dit document bevat de randvoorwaarden, aan welke normen de constructie getoetst wordt, welke toetsingen voor het VO zullen plaatsvinden en de beoogde werkwijze. Buiten de scope valt de daadwerkelijke VO-analyse.

## 1.3 Kwaliteitsborging

De kwaliteitsbewaking bij de totstandkoming van dit document is uitgevoerd volgens het kwaliteitsmanagementsysteem van Haskoning. Dit systeem is gecertificeerd volgens ISO 9001, ISO 14001 en OHSAS 18001. Het proces van toetsing en aanpassing is aantoonbaar doorlopen. De bewijsstukken in de vorm van getoetste exemplaren met commentaar zijn beschikbaar bij Haskoning.

# 2 Documenten, normen en richtlijnen

## 2.1 Beschikbare informatie

Dit document is opgesteld aan de hand van enkele andere documenten. Deze zijn, met uitzondering van de toegepaste normen richtlijnen, weergegeven in Tabel 2-1.

*Tabel 2-1: Relevante documenten voor VO Reefbrug*

| Ref. | Document nr. | Titel |
|---|---|---|
| [R1] | P085 SO | Reefbrug – Schetsontwerp gebruik oude windturbineblad als hoofddraagconstructie. |
| [R2] | BRIS art. 1.4 bijlage II | Uitgaven en verwijzingen van vigerende regelgeving. |
| [R3] | *JRC - EUR 23984 EN* | 'Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations'. H. Cristoph, B. Christiane, K. Andreas, et. al, Joint and Research Center (JRC) Scientific and Technical Report, European Commission. (2009)." |

## 2.2 Normen en Richtlijnen

Alle kunstwerken in Nederland dienen te voldoen aan het besluit bouwwerken en leefomgeving (BBL). In dit besluit wordt voor het ontwerpen van kunstwerken verwezen naar normen en richtlijnen. De normen en richtlijnen conform BBL met beschikbare nationale bijlagen geldend op 01 april 2026 zijn van toepassing op dit project en zijn derhalve toegepast bij het opstellen van dit uitgangspuntenrapport, zie ook [R2]. Er wordt in Tabel 2-2 een opsomming gegeven van de normen en richtlijnen die relevant zijn voor het constructief ontwerp van dit kunstwerk.

*Tabel 2-2: Normenlijst en Richtlijnen*

| Ref | Norm | Versie | Titel |
|---|---|---|---|
| [N1] | NEN-EN 1990 | +A1+A1/C2:2019 | Grondslagen voor het constructief ontwerp |
| [N2] | NEN-EN 1990 | +A1+A1/C2/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1990 |
| [N3] | NEN-EN 1991-1-1 | +C1+C11:2019 | Belastingen op constructies – Deel 1-1: Algemene belastingen – Volumieke gewichten, eigengewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen |
| [N4] | NEN-EN 1991-1-1 | +C1+C11:2019/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 |
| [N5] | NEN-EN 1991-1-4 | +A1+C2:2011 | Belastingen op constructies – Deel 1-4: Algemene belastingen – Windbelasting |
| [N6] | NEN-EN 1991-1-4 | +A1+C2:2011/NB:2019+C1:2023 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-4 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| [N7] | NEN-EN 1991-1-5 | +C1:2011 | Belastingen op constructies – Deel 1-5: Algemene belastingen – Thermische belasting |
| [N8] | NEN-EN 1991-1-5 | +C1:2011/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-5 |
| [N9] | NEN-EN 1991-2 | +C1:2015 | Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen |
| [N10] | NEN-EN 1991-2 | +C1:2015/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-2 |
| [N11] | NEN-EN 1992-1-1 | +C2:2011 | Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen |
| [N12] | NEN-EN 1992-1-1 | +C1:2011/NB:2016+A1:2020 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1992-1-1+C2:2011 |
| [N13] | NEN-EN 1993-1-1 | 2006+C2+A1:2016 | Ontwerp en berekening van staalconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen |
| [N14] | NEN-EN 1993-1-1 | 2006+C2+A1/NB:2016 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1993-1-1 |
| [N15] | NEN-EN 1993-1-8 | 2006+C2:2011 | Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-8: Ontwerp en berekening van verbindingen |
| [N16] | NEN-EN 1993-1-8 | 2006+C2:2011/NB:2011 nl | Nationale bijlage bij NEN-EN 1993-1-8 |
| [N17] | NEN-EN 1997-1 | 2005 en | Geotechnisch ontwerp - Deel 1: Algemene besluit |
| [N18] | NEN-EN 1997-1 | 2005+C1+A1:2016/NB:2025 nl | Nationale bijlage bij NEN-EN 1997-1-1 |
| **Ref** | **Richtlijn** | **Versie** | **Titel** |
| [N19] | CROW-CUR 96 | 2019 | Vezel versterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies |
| [N20] | CEN/TS 19101 | 2022 | Design of fibre-polymer composite structures. |

# 3 Randvoorwaarden en uitgangspunten

## 3.1 Voorwaarden aan vormgeving

### 3.1.1 Afmetingen

De afmetingen van het dek bedragen:

- Totale lengte hoofdoverspanning: $L_{dek}$ = 14,0 m.
- Maximale lengte aanbrug $L_{aanbrug}$ = 4 m.
- Nuttige breedte dek: $B_{dek}$ = 2,50 m.

Het ontwerp is gebaseerd op het type blad LM25. De geometrie van het blad wordt ontleed aan de puntenwolkenscan. De afmetingen van het windmolenblad bedragen [R1]:

- Totale lengte blad: $L_{blad}$ = 21.9 m (zonder tip), 25,5 m (met tip).
- Maximale breedte blad: $B_{blad,max}$ = 1,50 m.
- Maximale hoogte blad: $H_{blad,max}$ = 2,20 m.
- Eigen gewicht blad: 4,2 ton.

### 3.1.2 Helling

Het dek wordt als een vlakke helling uitgevoerd over de lengte van de brug. De helling voldoet aan de volgende maxima conform de richtlijnen van de ACOR:

- Hoogteverschil ≤ 250 mm → max 1:12
- 250 mm ≤ Hoogteverschil ≤ 500 mm → max 1:16
- Hoogteverschil ≤ 500 mm → max 1:25

### 3.1.3 Zeeg & Toog

De bladen zijn end-of-use elementen. De vorm is een gegeven. Omdat het brugdek onder een constante vlakke helling wordt gelegd, afwaterend naar één zijde, is er ook geen toog voorzien ten behoeve van afwatering.

## 3.2 Ontwerp levensduur en betrouwbaarheid

De vervangende Reefbrug is een voetgangers- en fietsbrug conform tabel NB.11, Bijlage A2.1 uit [N2] geclassificeerd zoals weergegeven in Tabel 3-1.

*Tabel 3-1: Classificaties Reefbrug*

| Omschrijving | Classificatie |
|---|---|
| Ontwerplevensduurklasse | 3 |
| Ontwerplevensduur | 50 jaar |
| Constructie | Fietsvoetgangersbrug |
| Gevolgklasse | CC1 |

## 3.3 Materiaaleigenschappen

Voor de materiaaleigenschappen is globaal per materiaal een keuze gemaakt in klasse, conform relevante norm, zoals weergegeven in Tabel 3-2, ontleed van [N3] en [N4].

*Tabel 3-2: Materiaaleigenschappen Reefbrug*

| Materiaal | Sterkteklasse | Soortelijke massa/ gewicht |
|---|---|---|
| Beton | C35/45 | 2500 kg/m$^3$ |
| Wapening staal | B500B | - |
| Staal | S355 | 7850 kg/m$^3$ |
| Bouten | 8.8 | 7850 kg/m$^3$ |
| Hout | D70 | 1080 kg/m$^3$ |
| Vezel versterkt kunststof | Glasvezelversterkte polyesterhars (kan ook vinylesterhars zijn) | Bestaand: 1520 - 1660 kg/m$^3$ (afh. vezelvolumegehalte Vf) Nieuw: 1900 kg/m$^3$ |
| Slijtlaag | - | 0,12 kN/m$^2$ |

## 3.4 Belastingen

### 3.4.1 Gelijkmatig verdeelde belasting

Conform de [N10] art. 5.3.2.1 is vergelijking NB1-5.1 toegepast:
$q_{fk}$ = 2,0 + 120/ (L + 30) = 2,0 + 120/ (14,0 + 30) = ~4,75 kN/m²
Conform art. 5.3.2.1 (2) worden de belastingen enkel toegepast op de ongunstigste delen van het invloed vlak. Dit is vooral van belang bij een evt. overstek achter het steunpunt op de noordelijke oever.

### 3.4.2 Bijkomende horizontale belasting

Conform de [N10] 5.4 is 10% van de verticale gelijkmatig verdeelde belasting aangehouden: 0,1 * 4,75 = 0,475 kN/m$^2$.

- De horizontale belasting werkt in de overspanningsrichting van de brug.
- De horizontale belasting treedt gelijktijdig op met de overeenkomstige verticale belasting.
- De horizontale belasting valt binnen hetzelfde belastinggeval als de verticale belasting.

### 3.4.3 Geconcentreerde belasting

Conform[N10] art. 5.3.2.2 is een geconcentreerde belasting van 7 kN op een vlak van 0,1 x 0,1 m$^2$ aangehouden.

### 3.4.4 Voertuigen

Permanente obstakels aan beide kanten van de brug verhinderen de aanwezigheid van voertuigen op de brug. Daarom worden zowel het dienstvoertuig als het onbedoelde voertuig uitgesloten conform [N9] art. 5.3.2.3 opm. 2 en art. 5.6.3 opm.1 respectievelijk.

### 3.4.5 Belasting op leuningen

De belasting op leuningen is conform de [N10] art. 4.8 een lijnlast 1,0 kN/m, werkend afzonderlijk horizontaal loodrecht op de leuning en verticaal op de leuning.

### 3.4.6 Windbelasting

Windbelasting conform [N5] art. 8.3.2 de windbelasting bepaald als:

Uitgangspunten:

- Windgebied II (Rotterdam)
- Hoogte $z_0$ = Z = 2,5 m.
- Terreincategorie 2 (onbebouwd).

Windbelasting haaks op overspanningsrichting:

- Extreme stuwdruk $q_b(z)$ = 0,645 kN/m$^2$.
- Kracht coëfficiënt $c_{fx,0}$ = 1,3; $c_e(z)$ = 1,5.
- Referentie hoogte van het aangeblazen vlak $d_{tot}$ = 2,2 m; met c.a. de helft voor 2$^e$ ligger (dus totaal 3/2 $d_{tot}$ ligger).
- Lijnlast $q_{b,y}$ = 0,645 * 1,3 * 1,5 * 3/2 * 2,2 = 4,15 kN/m.

Windbelasting in globale z-richting:

- Extreme stuwdruk $q_p(z)$ = 0,645 kN/m$^2$.
- Kracht coëfficiënt $c_{fz}$ = 0,65; $c_e(z)$ = 1,5.
- Referentie breedte van brug = $b_{tot}$ = 5,3 m.
- Lijnlast $q_{b,z}$ = 0,645 * 0,65 * 1,5 * 5,3 = 3,33 kN/m.
- Excentriciteit windbelasting op- of neerwaarts; e = b/4 = 1,325 m.

Vanwege de specifieke vorm van de brugliggers wordt een extra verificatie gedaan op aanvullende risico's voortkomend uit de vormgeving.

### 3.4.7 Sneeuwbelasting

Sneeuwbelasting is niet maatgevend ten opzichte van de vlaklast door gebruikers. Belastingsgeval wordt niet verder beschouwd.

### 3.4.8 Temperatuurbelasting

De temperatuur belasting is conform [N8] art. 6.1.3.2 voor een Type 1 stalen brug, licht gekleurd bepaald.

#### 3.4.8.1 Gelijkmatige temperatuur component

Voor de gelijkmatige temperatuurcomponent zijn de volgende temperaturen aangehouden:

- $T_{max}$ = 30°C.
- $T_{min}$ = -25°C.
- $T_0$ = 10°C.
- $T_{e,max} = T_{max}$ + 16°C = 46°C.
- $T_{e,min} = T_{min}$ - 3°C = 28°C.

Voor de gelijkmatige temperatuurcomponent van de temperatuurbelasting zijn de volgende temperatuurverschillen aangehouden:

- Uitzetting, $\Delta T_{n,exp} = T_{e,max} + T_0$ = 46°C – 10°C = 36°C.
- Krimp, $\Delta T_{n,con} = T_0 – T_{e,min}$ = 10°C + 28°C = (-) 38°C.

#### 3.4.8.2 Verticale lineaire temperatuur component

Voor de verticale lineaire temperatuurverschilcomponent zijn de volgende waardes aangehouden:

- $\Delta T_{m,heat}$ = 18 °C.
- $\Delta T_{m,cool}$ = 13 °C.
- $k_{sur}$ = 1,6 bij boven warmer dan onder & 0,6 bij onder warmer dan boven.

#### 3.4.8.3 Uitzetting voegen

Voor het bepalen van de voeguitzetting en -inkrimping zijn de volgende temperaturen bepaald:

- $\Delta T_{n,exp,voeg} = \Delta T_{n,exp} + 20°C = 56°C$.
- $\Delta T_{n,con,voeg} = \Delta T_{n,exp} + 20°C = (-)\ 58°C$.
- $\Delta T_{n,voeg} = \Delta T_{n,exp,voeg} + \Delta T_{n,con,voeg} = 114°C$.

### 3.4.9 Belasting combinaties

Belastingsfactoren conform [N2] tabel NB.16 – A2.4(B), zoals is weergegeven in Tabel 3-3.

*Tabel 3-3: Belasting factoren CC1 constructie*

| Gevolg-klasse | Blijvende belasting | | | Veranderlijk | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ongunstig $(\xi)\gamma_{G,j,sup}$ | | Gunstig $\gamma_{G,j,inf}$ | Verkeer $\gamma_{Q,i}$ | Overig veranderlijk $\gamma_{Q,i}$ |
| | 6.10 a | 6.10 b | | | |
| CC1 | 1.2 | 1.1 | 0.9 | 1.2 | 1.35 |

ψ-factoren conform [N2] tabel NB.13 – A2.2, zoals is weergegeven in Tabel 3-4. Voor kruip, waar ook $\Psi_2$ wordt gebruikt, is onderstaande tabel niet van toepassing; kruip wordt niet getoetst.

*Tabel 3-4: Partiele factoren fiets- en voetgangersbrug*

| Belasting | Symbool | | $\Psi_0$ | $\Psi_1$ | $\Psi_2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Verkeersbelasting | gr1 | Gelijkmatig verdeelde belasting $q_{fk}$ | 0,4 | 0,8 | 0,4 |
| | | Horizontale belasting $q_{flk}$ | 0,4 | 0,8 | 0 |
| | Geconcentreerde belasting $Q_{fwk}$ | | 0 | 0,8 | 0 |
| Windkrachten | $F_{wk}$ | Blijvende ontwerpsituatie | 0,3 | 0,6 | 0 |
| | | Uitvoering | 0,8 | 0 | 0 |
| Thermische belasting | $T_k$ | | 0,3 | 0,8 | 0,3 |
| Belasting tijdens bouw | $Q_c$ | | 1,0 | 0 | 1,0 |

Combinatie regels conform [N2] tabel NB.15 – A2.4(B), zoals is weergegeven in Tabel 3-5.

*Tabel 3-5: Combinatie regels voor belastingen op fiets- en voetgangersbruggen*

| Ontwerp situaties | Blijvende belasting | | Overheer-sende belasting | Tegelijkertijd optredende veranderlijke belasting | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ongunstig | Gunstig | | Belangrijkste | Andere |
| 6.10 a | $\gamma_{G,j,sup} * G_{k,j,sup}$ | $\gamma_{G,j,inf} * G_{k,j,inf}$ | | $\Psi_{0,1} * \gamma_{Q,1} * Q_{k,1}$ | $\Psi_{0,i} * \gamma_{Q,i} * Q_{k,i}$ |
| 6.10 b | $\xi\gamma_{G,j,sup} * G_{k,j,sup}$ | $\gamma_{G,j,inf} * G_{k,j,inf}$ | $\gamma_{Q,1} * Q_{k,1}$ | | $\Psi_{0,i} * \gamma_{Q,i} * Q_{k,i}$ |

## 3.5 Uiterste grenstoestand eisen

### 3.5.1 Globale UGT toetsen

- Globale druk/ trek in midden overspanning.
- Stabiliteit op druk belaste panelen.
- Opzet fundering.

### 3.5.2 Lokale UGT toetsen

- Sterkte ligger bij oplegging.
- Stabiliteit op druk belaste panelen.
- Sterkte dek (hoofdoverspanning en aanbruggen) + dwarsdragers.
- Sterkte verbinding dwarsdragers met blad.

## 3.6 Bruikbaarheids-grenstoestand eisen

### 3.6.1 Doorbuigingseisen

Er geldt een maximale doorbuiging onder veranderlijke belasting van 1:100 van de overspanning.

### 3.6.2 Trilling/comfort

De volgende uitgangspunten zijn gebaseerd op de bevindingen uit [R5]. Hierbij geldt dat de volgende klassen worden aangehouden:

- Comfort class CL2.
- Traffic class TC3.

Voor verticale trillingen geldt:

- Bij geen eigenfrequentie tussen 1 en 5 Hz wordt er geen verdere toetsing uitgevoerd.
- Indien er wel een eigenfrequentie tussen 1 en 5 Hz is, dient de bijhorende verticale versnelling gelimiteerd te worden tot 0,7 m/s$^2$.

Voor horizontale trillingen geldt:

- Bij geen eigenfrequentie tussen 0,5 en 1,2 Hz is, wordt er geen verdere toetsing uitgevoerd.
- Indien er wel een eigenfrequentie tussen 0,5 en 1,2 Hz is, dient de bijhorende verticale versnelling gelimiteerd te worden tot 0,2 m/s$^2$.

### 3.6.3 Vervorming leuning

Ten behoeve van een veilig gevoel bij gebruik van de brug wordt de maximale horizontale vervorming van de leuning gelimiteerd tot 20 mm.

## 3.7 Werkwijze constructieve bepalingen

Voor de toetsing van het ontwerp wordt gebruik gemaakt van 2 methoden. Er is aan de hand van een geometriescan een 3d eindige-elementenmodel (EEM/ FEM) opgezet in SoFiSTiK. Dit model is niet een perfecte representatie van het daadwerkelijke windmolenblad zoals geobserveerd in de snijstukken. Globale toetsen worden op basis van het eindige-elementenanalyse (EEA/ FEA) uitgevoerd. De toetsen worden uitgevoerd aan de hand van [N19]. Aanvullend worden lokale toetsingen analytisch gedaan aan de hand van [N19] en waar relevant wordt gebruik gemaakt van [N20]. In Tabel 3-6 is een overzicht gegeven van de uit te voeren toetsingen voor het VO van de Reefbrug.

De eerste toets wordt gedaan op basis van het vereenvoudigd rekcriterium conform [N19]. De definitieve toetsen worden uitgevoerd met behulp van de testresultaten aan laminaten van een vergelijkbaar windturbineblad.

*Tabel 3-6: Overzicht uit te voeren toetsingen VO Reefbrug*

| Toetsing | Methode | Nivea toetsing voor VO |
|---|---|---|
| **Globale toetsingen** | | |
| Interne spanningen/ rek | FEA | Toetsen spanningen/rekken bij:<br>• Midden overspanning; trek/druk zone.<br>• Oplegging.<br>• Maatgevende spanning/ rek per deel doorsnede. |
| Verplaatsing | FEA | Maximaal optredende doorbuiging en laterale verplaatsing/ hoekverdraaiing bladen + horizontale verplaatsing leuning. |
| Eigen frequentie | FEA | Laagste eigen frequentie lateraal en verticaal en evt. optredende versnelling. |
| Reactiekrachten | FEA | Reactiekrachten bij gekozen oplegsysteem. |
| **Lokale toetsingen** | | |
| Plooi | Analytisch | Eerste beoordeling (inschatten risico) |
| Verbinding | Analytisch | Eerste beoordeling, haalbaar principe oplossingen – evt. bepalen benodigde componentproeven. |
| Dwarsdragers/ dek | Analytisch | Bepalen opbouw dek + dwarsdrager. |
| Leuning | Analytisch | Bepalen mogelijke samenstelling en bevestiging. |

# Bijlage C – VO-berekeningsrapport

RAPPORT

# VO-Rapportage Vervanging Reefbrug

Hergebruik windturbinebladen in een brugconstructie

| | |
|---|---|
| Klant: | Ingenieursbureau Gemeente Rotterdam |
| Referentie: | BJ7949-HAS-XX-XX-RP-C-0004 |
| Status: | Definitief/01 |
| Datum: | 10 september 2026 |

Haskoning
Enhancing Society Together

**HASKONING NEDERLAND B.V.**

Mijnbouwstraat 120
2628 RX Delft
Netherlands
Mobility & Infrastructure
Trade register number: 56515154

E-mail: info@haskoning.com
Website: haskoning.com

| | |
|---|---|
| Titel document: | VO-Rapportage Vervanging Reefbrug |
| Ondertitel: | Hergebruik windturbinebladen in een brugconstructie |
| Referentie: | BJ7949-HAS-XX-XX-RP-C-0004 |
| Uw kenmerk | Click or tap here to enter text. |
| Status: | Definitief/01 |
| Datum: | 10 september 2026 |
| Projectnaam: | Reefbrug |
| Projectnummer: | BJ7949 |
| Auteur(s): | Coen Cosijn |
| Opgesteld door: | Click here to enter text. |
| Gecontroleerd door: | Liesbeth Tromp |
| Datum: | 4 augustus 2026 |
| Goedgekeurd door: | Liesbeth Tromp |
| Datum: | 4 augustus 2026 |
| Classificatie: | Projectgerelateerd |

*Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. Haskoning Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.*

*Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van Haskoning Nederland B.V. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat. Dit document kan zijn opgesteld met behulp van kunstmatige intelligentie (AI); alle door AI gegenereerde inhoud is beoordeeld en gevalideerd door onze experts.*

Haskoning
Enhancing Society Together

# Inhoud


**1 Inleiding 1**
1.1 Projectomschrijving 1
1.2 Doel en scope 1
1.3 Werkwijze 1
1.4 Kwaliteitsbewaking 3

**2 Documenten, normen en richtlijnen 4**
2.1 Normen en Richtlijnen 4
2.2 Beschikbare informatie 5

**3 Randvoorwaarden en uitgangspunten 6**
3.1 Vormgeving 6
3.1.1 Afmetingen 6
3.1.2 Helling 6
3.1.3 Zeeg & Toog 6
3.2 Ontwerp levensduur en betrouwbaarheid 6
3.3 Materiaaleigenschappen 7
3.3.1 Nieuw toe te passen materialen 7
3.3.2 Bepaling materiaaleigenschappen windturbine ligger 8
3.4 Duurzaamheid 13

**4 Variantenstudie 14**
4.1 Hoofddraagconstructie 14
4.2 Verbinding dekconstructie met hoofddraagconstructie 17
4.3 Dekopbouw 18

**5 Constructieve beschouwing VO 20**
5.1 Constructief principe 20
5.2 Eindige elementenmodel 21
5.2.1 Geometrie 21
5.2.2 Model 22
5.2.3 Randvoorwaarden 23
5.3 Belastingen 24
5.3.1 Belastingsgevallen 24
5.3.2 Belastingcombinaties 25
5.4 Sterktetoets windturbineligger 26
5.5 Verplaatsing 27
5.5.1 Globaal 27
5.5.2 Leuning 28

5.6 Trillingen 28
5.7 Lokale stabiliteit 29
5.7.1 Dek, leuning, randbalk en dwarsdragers 30
5.7.2 Dekken 31
5.7.3 Leuning en randbalk 31
5.7.4 Dwarsdragers 31
5.8 Verbinding dwarsdrager met windturbineligger 32
5.9 Reactiekrachten 34

**6 Vergelijking aangehouden materiaaleigenschappen VO met testresultaten 35**

6.1 Doel 35
6.1.1 Proefstukken en testbatches 35
6.1.2 Invloed afwijkingen in vezel oriëntatie. 36
6.2 Methode 36
6.3 Resultaat 37
6.3.1 Materiaaleigenschappen, algemeen 37
6.3.2 Verschillen in lineaire rekgrens. 38
6.4 Vergelijking testwaarden met aangehouden waarden in het VO 39
6.5 Conclusie coupontesten 40

**7 Conclusie 42**

## Tabellen

Tabel 2-1: Normenlijst en Richtlijnen 4
Tabel 2-2: Relevante documenten voor VO Reefbrug 5
Tabel 3-1: Classificatie Reefbrug 7
Tabel 3-2: Klasse en soortelijke massa materialen Reefbrug 7
Tabel 3-3: Mat eigenschappen nieuw gebruikte laminaten VO Reefbrug 8
Tabel 3-4: afgeleide lamel-stijfheidseigenschappen blad Reefbrug 10
Tabel 3-5: Verdeling vezels in blad Reefbrug 11
Tabel 3-6: Laminaat eigenschappen blad Reefbrug per doorsnededeel 12
Tabel 3-7: Dikte laminaat blad Reefbrug bij elk doorsnede deel op elke lengte deel 12
Tabel 5-1: Relevante belastingen voor de Reefbrug, belastingen uit [N9] en [N10]. 24
Tabel 5-2: Belasting factoren CC1 constructie 25
Tabel 5-3: Partiele factoren fiets- en voetgangersbrug 25
Tabel 5-4: Combinatie regels voor belastingen op fiets- en voetgangersbruggen 26
Tabel 5-5: Omhullende spanningen en daarbij horende uitnuttingsgraad (UC) VO Reefbrug 27
Tabel 5-6: Eigenfrequenties Reefbrug door eigen gewicht 28

Tabel 5-7: Reactiekrachten Reefbrug, waardes in kN, dikgedrukt maatgevende waarde in die lastrichting 34
Tabel 6-1: Batchgrootte coupontesten E-LP en E-TP VO Reefbrug. 36
Tabel 6-2: Effect van hoek vezels t.o.v. teststuk voor UD teststukken VO Reefbrug 36
Tabel 6-3: Resultaten verwerken testgegevens VO Reefbrug 37
Tabel 6-4: Vergelijking testresultaten voor lineaire rekgrens met karakteristieke richtwaarden CUR96 voor VO Reefbrug. 39
Tabel 6-5: Stijfheid en sterkte vergelijking lameleigenschappen tussen coupontest resultaten en aangehouden waardes VO Reefbrug 40
Tabel 6-6: Samenstelling laminaten TP en LP  VO Reefbrug 40

# Figuren

Figuur 1-1: Huidige Reefbrug 1
Figuur 3-1: Overzicht lengte-delingen blad voor Reefbrug 9
Figuur 3-2: Overzicht doorsnede-delingen blad voor Reefbrug 9
Figuur 4-1: SO-variant Puur (en/of Kracht op basis van oplegschema). 14
Figuur 4-2: Varianten 1ste iteratie VO, wortel respectievelijk vrij opgelegd en ingeklemd, met/zonder steunpunt. 14
Figuur 4-3: Resultaten 1D analyse voor 18 m overspanning, wortel rotatievrij en ingeklemd gemodelleerd, met/zonder steunpunt VO Reefbrug 15
Figuur 4-4: Gebruikte oplegschema's voor 1ste E.E.A, 18 meter overspanning, wortel rotatievrij en ingeklemd, VO Reefbrug 16
Figuur 4-5: VO-variant 3, hoofdoverspanning van 14 meter, rotatievrij opgelegd. 17
Figuur 4-6: Opties verbinding; respectievelijk boutverbinding (beugel weergegeven) en buisverbinding 17
Figuur 5-1: Schematischte mechanisch systeem VO Reefbrug 21
Figuur 5-2: Doorsnede windturbineligger, lengtedeel F, VO Reefbrug 22
Figuur 5-3: Overzicht 3D E.E.M. model VO Reefbrug, kleuren geven unieke groepen weer. 22
Figuur 5-4: Oplegsysteem VO Reefbrug, zijaanzicht. 23
Figuur 5-5: Spanningen in lokale x-richting, buitenzijde laminaat, weergave van spanningen gelimiteerd tot -32,0 MPa, VO Reefbrug 26
Figuur 5-6: Spanningen in lokale y-richting, buitenzijde laminaat, weergave van spanningen gelimiteerd tot -37,6 MPa, VO Reefbrug 26
Figuur 5-7: Doorbuiging Reefbrug door veel voorkomende belastingscombinaties 27
Figuur 5-8: Spanningen in staartzone blad Reefbrug (TE secties E, F & G) 29
Figuur 5-9: Oplegschema bepaling knikspanning staart blad Reedbrug (1 zijde scharnierend, 1 zijde ingeklemd) 30
Figuur 5-10: Schetsen dekconstructie (100mm sandwichpaneel), randbalk (PFC 200x90), leuning (40x3 met maasgrootte 50x50mm) en dwarsbalk (HEA14) voor VO Reefbrug 30
Figuur 5-11: Locatie eerste verbinding dwarsdrager Reefbrug (witte arcering) 32
Figuur 5-12: Ontwerp verbinding dwarsdrager-blad VO Reefbrug 33

# Bijlagen

Bijlage I
Bepaling doorsnede eigenschappen voor 1D toets

Bijlage II
Rapportage SoFiSTiK

Bijlage III
VO Toetsing kritieke drukspanning

Bijlage IV
VO Toetsing leuning en randbalk

Bijlage V
VO Toetsing dekken

Bijlage VI
VO Toetsing dwarsdragers

Bijlage VII
VO Toetsing verbinding dwarsdrager met turbineligger

Bijlage VIII
Reactiekrachten

Bijlage IX
Bepaling karakteristieke waarden uit de testen

# 1 Inleiding

## 1.1 Projectomschrijving

De Gemeente Rotterdam heeft een vervangingsopgave voor de Reefbrug, liggende in Rotterdam zuid. De Reefbrug is een fiets- en voetgangersbrug die de woonwijk Zuidwijk met het Havenspoorpad verbindt. De huidige brug is een houten brug die aan vervangen toe is. Zie Figuur 1-1 voor de huidige Reefbrug.



*Figuur 1-1: Huidige Reefbrug*

Ter vervanging van de Reefbrug heeft de Gemeente Rotterdam de ambitie om een circulaire brug op dezelfde plek te plaatsen. Hierbij is gekozen voor een hoofddraagconstructie die bestaat uit einde-leven windturbinebladen.

## 1.2 Doel en scope

Het doel van dit document is het beschrijven van het VO-ontwerp en toetsing voor de vervanging van de Reefbrug. Dit bevat een overzicht van de randvoorwaarden, een beschrijving van het gebruikte eindige elementen model, de globale toetsing en analytische lokale toetsingen.

In het VO moet in hoofdlijnen gekozen worden welke onderdelen en principe-oplossingen gebruikt gaan worden voor de vervangende Reefbrug. Elke uitgevoerde toets is dan ook enkel uitgevoerd als verdiepend genoeg voor het maken van een geïnformeerde keuze. De uitgevoerde toetsen en het niveau daarvan zijn gebaseerd op het uitgangspuntenrapport [R4]. Onderdeel hiervan is een gedetailleerd 3D-model.

## 1.3 Werkwijze

In een vooronderzoek zijn enkele configuraties voor de brug bekeken en in hoofdlijnen op basis van doorbuiging met elkaar vergeleken. Bij aanvang van de VO-fase zijn op basis van het schetsontwerp (SO [R1]) de NM52/900 bladen geselecteerd als liggers voor de

hoofddraagconstructie. In deze VO-fase wordt het ontwerp verder uitgewerkt tot een architectonisch, inpasbaar en bouwbaar concept. Toetsingen zijn uitgevoerd om de technische haalbaarheid van het VO vast te stellen. Hierbij zijn enkel de maatgevende belastingen op de hoofddraagconstructie getoetst op stijfheid en sterkte. De volledige toetsing van het object volgens de Eurocode is onderdeel van het DO.

Bij aanvang van het VO is op basis van een analytische berekening (ligger als lijnelement – 1D-studie) de haalbaarheid van het toepassen van de NM52/900 bladen beschouwd. De bladen zijn gemaakt van vezelversterkte kunststof (VVK). Deze bladen zijn vrijgekomen aan het einde van hun technische gebruik als windturbineblad. Met de 1D-studie is de vervorming getoetst, omdat deze veelal maatgevend is voor VVK-bruggen. Ook is een eerste inschatting gemaakt van het optredende buigend moment en de sterkte van het blad.

Als onderdeel van het VO zijn er door de TU Delft metingen en materiaaltesten uitgevoerd om de de materiaalopbouw en geometrie van het blad te bepalen. Met burn-off proeven [R6] is voor een aantal sneden van het blad over de doorsnede in de verschillende zones van de doorsnede de laminaatsamenstelling (lay-up) bepaald. Met behulp van VVK ontwerprichtlijn CROW-CUR96 [N19] is hiermee een inschatting gemaakt van de stijfheid van de laminaten in deze zones van de doorsnede. Op basis van het vereenvoudigd rekcriterium is vervolgens een eerste inschatting gemaakt van de materiaalsterkte. De VO-toets is uitgevoerd op basis van deze aangenomen materiaaleigenschappen.
Aan de hand van het resultaat van deze testen is het onderzoek uitgebreid naar een 3D eindige elementen analyse (3D E.E.M.). Met de conclusies van de hierboven genoemde onderzoeken zijn ook details bepaald die maatgevend zijn voor het VO. Voor deze details zijn principe-oplossingen ontwikkeld, die vervolgens analytisch getoetst zijn. \

Met dit 3D E.E.M. zijn de volgende constructieve analyses uitgevoerd:

- Globale sterkte toets.
- Globale doorbuiging.
- Eigenfrequentie analyse.

Analytisch zijn de volgende onderdelen behandeld:

- Lokale stabiliteit drukzone.
- Verbindingen dek – windturbine bladen.
- Detaillering dwarsdragers, dek, randbalk van het dek en de leuning.
- Reactiekrachten.

De eindige elementen-analyse is uitgevoerd op basis van aangenomen materiaaleigenschappen. Als onderdeel van het VO zijn vervolgens door de TU Delft sterkte-testen uitgevoerd op laminaat modules (uni-directioneel (UD) en multi (gemengde opbouw van bi-directioneel en CSM)), zie [R7]. De eerste resultaten hiervan zijn beschikbaar gekomen aan het einde van het VO-fase. Dit betreft de sterkte-testen van 2 zones, zijnde het Leading Panel (LP) en het Trailing Panel (TP). Met behulp van NEN-EN1990 [N1] zijn deze resultaten verwerkt tot karakteristieke materiaaleigenschappen, waarbij verschillende methoden van bepaling vergeleken zijn, om de invloed hiervan vast te stellen en de meest representatieve waarde te bepalen. De materiaaleigenschappen op basis van de testen zijn vervolgens vergeleken met de ingeschatte nominale karakteristieke materiaaleigenschappen die in de 3D E.E.M. gebruikt zijn, en de verschillen zijn beoordeeld. Vervolgens is geconcludeerd dat het VO technisch haalbaar is.

## 1.4 Kwaliteitsbewaking

De kwaliteitsbewaking bij de totstandkoming van dit document is uitgevoerd volgens het kwaliteitsmanagementsysteem van Haskoning. Dit systeem is gecertificeerd volgens ISO 9001, ISO 14001 en OHSAS 18001. Het proces van toetsing en aanpassing is aantoonbaar doorlopen. De bewijsstukken in de vorm van getoetste exemplaren met commentaar zijn beschikbaar bij Haskoning.

# 2 Documenten, normen en richtlijnen

## 2.1 Normen en Richtlijnen

Alle kunstwerken in Nederland dienen te voldoen aan het besluit bouwwerken en leefomgeving (BBL). In dit besluit wordt voor het ontwerpen van kunstwerken verwezen naar normen en richtlijnen. De normen en richtlijnen conform BBL met beschikbare nationale bijlagen geldend op 01 april 2026 zijn van toepassing op dit project en zijn derhalve toegepast bij het opstellen van dit uitgangspuntenrapport, zie ook [R2]. Er wordt in Tabel 2-1 een opsomming gegeven van de normen en richtlijnen die relevant zijn voor het constructief ontwerp van dit kunstwerk.

*Tabel 2-1: Normenlijst en Richtlijnen*

| Ref | Norm | Versie | Titel |
|---|---|---|---|
| [N1] | NEN-EN 1990 | +A1+A1/C2:2019 | Grondslagen voor het constructief ontwerp |
| [N2] | NEN-EN 1990 | +A1+A1/C2/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1990 |

| Ref | Norm | Versie | Titel |
|---|---|---|---|
| [N3] | NEN-EN 1991-1-1 | +C1+C11:2019 | Belastingen op constructies – Deel 1-1: Algemene belastingen – Volumieke gewichten, eigengewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen |
| [N4] | NEN-EN 1991-1-1 | +C1+C11:2019/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 |
| [N5] | NEN-EN 1991-1-4 | +A1+C2:2011 | Belastingen op constructies – Deel 1-4: Algemene belastingen – Windbelasting |
| [N6] | NEN-EN 1991-1-4 | +A1+C2:2011/NB:2019+C1:2023 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-4 |
| [N7] | NEN-EN 1991-1-5 | +C1:2011 | Belastingen op constructies – Deel 1-5: Algemene belastingen – Thermische belasting |
| [N8] | NEN-EN 1991-1-5 | +C1:2011/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-5 |
| [N9] | NEN-EN 1991-2 | +C1:2015 | Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen |
| [N10] | NEN-EN 1991-2 | +C1:2015/NB:2019 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-2 |
| [N11] | NEN-EN 1992-1-1 | +C2:2011 | Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen |
| [N12] | NEN-EN 1992-1-1 | +C1:2011/NB:2016+A1:2020 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1992-1-1+C2:2011 |
| [N13] | NEN-EN 1993-1-1 | 2006+C2+A1:2016 | Ontwerp en berekening van staalconstructies – |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen |
| [N14] | NEN-EN 1993-1-1 | 2006+C2+A1/NB:2016 | Nationale bijlage bij NEN-EN 1993-1-1 |
| [N15] | NEN-EN 1993-1-8 | 2006+C2:2011 | Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-8: Ontwerp en berekening van verbindingen |
| [N16] | NEN-EN 1993-1-8 | 2006+C2:2011/NB:2011 nl | Nationale bijlage bij NEN-EN 1993-1-8 |
| [N17] | NEN-EN 1997-1 | 2005 en | Geotechnisch ontwerp - Deel 1: Algemene besluit |
| [N18] | NEN-EN 1997-1 | 2005+C1+A1:2016/NB:2025 nl | Nationale bijlage bij NEN-EN 1997-1-1 |
| **Ref** | **Richtlijn** | **Versie** | **Titel** |
| [N19] | CROW-CUR 96 | 2019 | Vezel versterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies |
| [N20] | CEN/TS 19101 | 2022 | Design of fibre-polymer composite structures. |

## 2.2 Beschikbare informatie

Dit document is opgesteld aan de hand van diverse documenten en rapporten als onderdeel van het vooronderzoek. Deze zijn weergegeven in Tabel 2-2.

*Tabel 2-2: Relevante documenten voor VO Reefbrug*

| Ref. | Document nr. | Titel |
|---|---|---|
| [R1] | P085 SO | Reefbrug – Schetsontwerp gebruik oude windturbineblad als hoofddraagconstructie. |
| [R2] | BRIS art. 1.4 bijlage II | Uitgaven en verwijzingen van vigerende regelgeving. |
| [R3] | *JRC - EUR 23984 EN* | 'Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations'. H. Cristoph, B. Christiane, K. Andreas, et. al, Joint and Research Center (JRC) Scientific and Technical Report, European Commission.(2009)." |
| [R4] | BJ7949-HAS-XX-XX-RP-C-0004 | Uitgangspunten VO Reefbrug |
| [R5] | TU Delft BK 08/06/26 | Reefbrug project - Naming conventions of blade parts |
| [R6] | TU Delft BK 08/07/26 | Reefbrug project – Burn-off test results |
| [R7] | TU Delft BK 20/08/26 | Reefbrug project – Coupon tests – Preliminary design phase |

# 3 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Alle randvoorwaarden en uitgangspunten zijn benoemd in het uitgangspuntenrapport [R4] en worden in dit hoofdstuk samengevat.

## 3.1 Vormgeving

### 3.1.1 Afmetingen

De afmetingen van het dek bedragen:

- Totale lengte overspanning: $L_{dek}$ = 14,0 m
- Maximale lengte aanbrug: $L_{aanbrug}$ = 4,0 m
- Nuttige breedte dek: $B_{dek}$ = 2,50 m
- Hart op hart afstand dwarsdragers: $HOH_{dd}$ = 2,0 m

Het ontwerp is gebaseerd op het type blad NM52/900. De geometrie van het blad wordt ontleed aan de puntenwolkenscan. De afmetingen van het windmolenblad bedragen [R1]:

- Totale lengte blad: $L_{blad}$ = c.a. 21,9 m (zonder tip), 25,5 m (met tip)
- Maximale breedte blad: $B_{blad,max}$ = 1,50 m.
- Maximale hoogte blad: $H_{blad,max}$ = 2,20 m.
- Eigen gewicht blad: $G_{blad}$ = 4,2 ton.

### 3.1.2 Helling

Het dek wordt als een vlakke helling uitgevoerd over de lengte van de brug. De helling voldoet aan de volgende maxima conform de richtlijnen van de ACOR:

- Hoogteverschil ≤ 250 mm → max 1:12
- 250 mm ≤ Hoogteverschil ≤ 500 mm → max 1:16
- Hoogteverschil ≤ 500 mm → max 1:25

### 3.1.3 Zeeg & Toog

De bladen zijn secundaire elementen. De vorm is een gegeven. Omdat het brugdek onder een constante vlakke helling wordt gelegd, afwaterend naar één zijde, is er ook geen toog voorzien ten behoeve van afwatering.

## 3.2 Ontwerp levensduur en betrouwbaarheid

De vervangende Reefbrug is een voetgangers- en fietsbrug conform tabel NB.11, Bijlage A2.1 uit [N2] geclassificeerd zoals weergegeven in Tabel 3-1.

*Tabel 3-1: Classificatie Reefbrug*

| Omschrijving | Classificatie |
|---|---|
| Ontwerplevensduurklasse | 3 |
| Ontwerplevensduur | 50 jaar |
| Constructie | Fietsvoetgangersbrug |
| Gevolgklasse | CC1 |

## 3.3 Materiaaleigenschappen

In het VO is gebruik gemaakt van 2 materiaalsoorten: nieuw te produceren materialen, inclusief VVK voor het dek, en het VVK van de windturbinebladen. De materiaaleigenschappen zijn in 2 paragrafen onderverdeeld. Ten eerste zijn de nieuwe toe te passen materialen beschreven. In de tweede paragraaf is het proces beschreven om de VO-materiaaleigenschappen te bepalen voor de windturbinebladen, met de resulterende laminaateigenschappen.

### 3.3.1 Nieuw toe te passen materialen

Voor de materiaaleigenschappen is globaal per materiaal een keuze gemaakt in klasse, conform relevante norm, zoals weergegeven in Tabel 3-2, ontleed van [N3] en [N4].

*Tabel 3-2: Klasse en soortelijke massa materialen Reefbrug*

| Materiaal | Sterkteklasse | Soortelijke massa/ gewicht |
|---|---|---|
| Beton | C35/45 | 2500 kg/m$^3$ |
| Wapening staal | B500B | - |
| Staal | S355 | 7850 kg/m$^3$ |
| Bouten | 8.8 | 7850 kg/m$^3$ |
| Hout | D70 | 1080 kg/m$^3$ |
| Vezel versterkt kunststof | Glasvezelversterkte polyesterhars of vinylesterhars | 1900 kg/m$^3$ (vezelvolumegehalte Vf = 50%) |
| Slijtlaag | Bauxietkorrels met hars | 0,12 kN/m$^2$ |

Voor nieuw toe te passen glasvezelversterkte kunststoffen zijn 2 laminaten gebruikt. De sterkte-eigenschappen van de laminaten zijn gebaseerd op een versimpelde rekgrens conform CROW CUR96 [N19]. De rekgrenzen voor trek/ drukspanning en schuifspanning zijn respectievelijk 1,2% en 1,6%.

Vervolgens moeten hierbij ook materiaalfactoren in rekening worden gebracht. Deze bedragen:

- Materiaalfactor, $\gamma_M$ = 1,35 * 1,2 = 1,62.
- Conversiefactor voor waterdamp, $\eta_{cm}$ = 0,9.
- Conversiefactor voor vermoeiing, $\eta_{cf}$ = 0,9.

De totale reductiefactor op de rekgrens is dus 1,62/ (0,9* 0,9) = 2, waardoor de weerstand rekgrens voor trek/ druk of afschuiven respectievelijk $\varepsilon_{max}$ = 0,6% en $\gamma_{max}$ = 0,8% zijn. De maximaal toelaatbare spanning is vervolgens bepaald als $\sigma_{max} = E * \epsilon_{max}$ en $\tau_{max} = G * \gamma_{max}$. Deze zijn weergegeven in Tabel 3-3.

*Tabel 3-3: Mat eigenschappen nieuw gebruikte laminaten VO Reefbrug*

| Eigenschap | UD (62,5% 0°) | Quasi-isotoop |
|---|---|---|
| $E_x$ [GPa] | 33,93 | 14,8 |
| $E_y$ [GPa] | 16,4 | 14,8 |
| $G_{xy}$ [GPa] | 5,1 | 5,0 |
| $f_x$ [MPa] | 154,8 | 88,8 |
| $f_y$ [MPa] | 94,8 | 88,8 |
| $f_{xy}$ [MPa] | 36,8 | 40,0 |
| ρ [kN/m$^3$] | 18,5 | 18,5 |

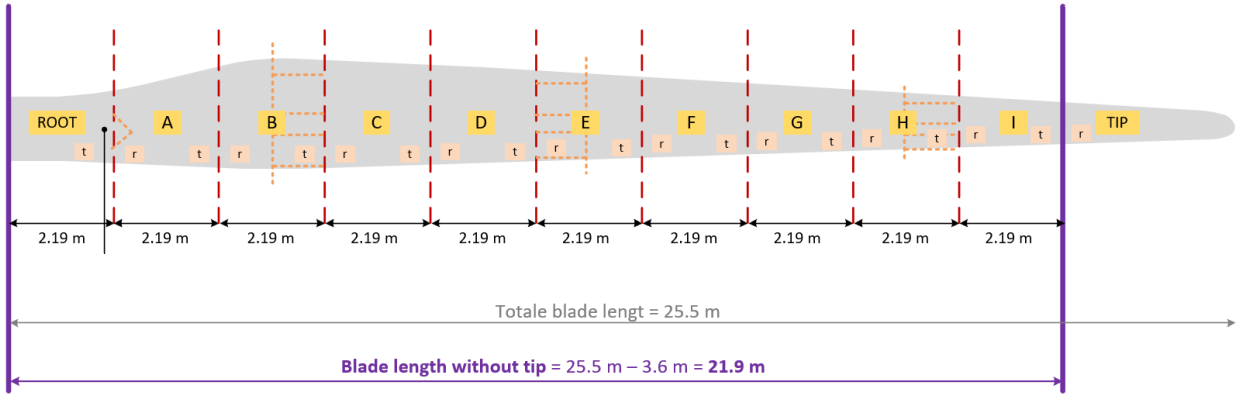
### 3.3.2 Bepaling materiaaleigenschappen windturbine ligger

Aan de hand van verschillende testen en metingen is de geometrie en sterkte van het blad vastgelegd. Voor de aanvang van het VO zijn de volgende testen uitgevoerd:

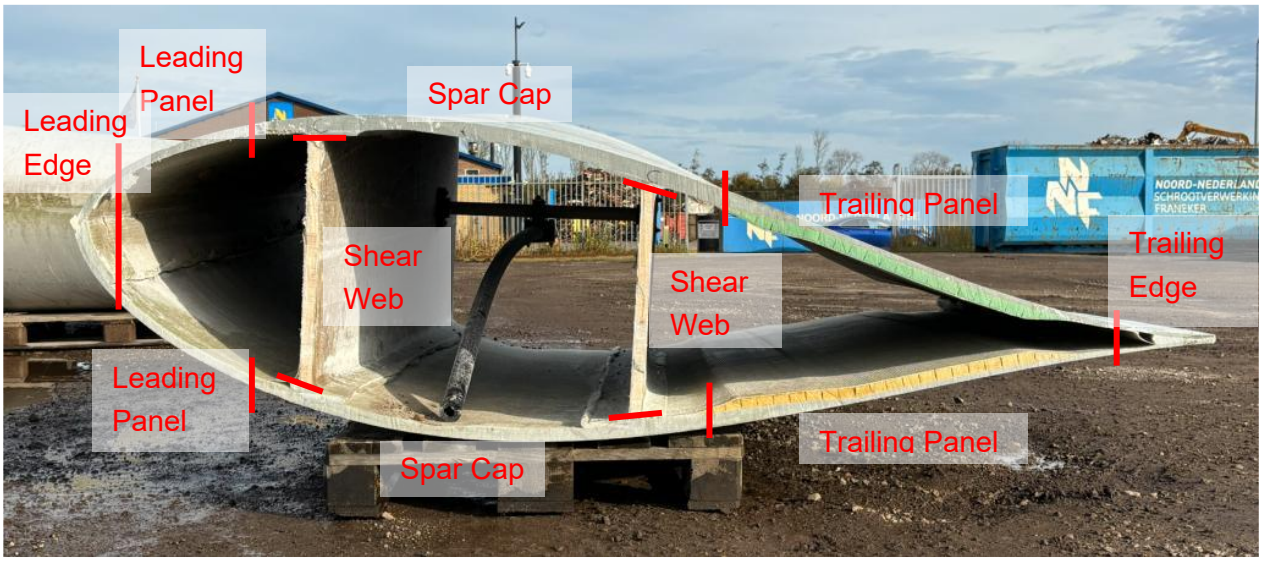
- 3D scan voor vastleggen geometrie van de bladen.
- Burn-off testen voor vastleggen samenstelling van het laminaat, zie [R6].

Voor het bepalen van de materiaaleigenschappen is eLamX versie 2 gebruikt (klassieke laminatentheorie).

Voor het opdelen van het blad in segmenten en doorsnede delen is de onderverdeling zoals beschreven in [R5] aangehouden. Deze deelt het blad in lengterichting in 10 delen in en in 6 doorsnededelen. Een overzicht van de delingen in lengterichting is gegeven in Figuur 3-1. Een overzicht van de delingen in de doorsnede is gegeven in Figuur 3-2.




*Figuur 3-1: Overzicht lengte-delingen blad voor Reefbrug*




*Figuur 3-2: Overzicht doorsnede-delingen blad voor Reefbrug*

Er is met burn-off tests [R6] en diktemetingen een overzicht gecreëerd van de gebruikte materialen. In een iteratief proces is een materiaal samenstelling gekozen, waarmee de waargenomen lamellen, laminaat diktes, lamelmassa en laminaat massa benaderd zijn. De basis hiervan vormt de gemeten lamel massa per verschillend lameltype. Er zijn zowel **U**ni-**D**irectioneel, **BI**directioneel als **C**hopped-**S**trand-**M**atten gebruikt zijn.

Aan de hand van de gemeten vezelmassa's zijn de sterkte- en stijfheidseigenschappen van de lamellen bepaald. De gebruikte vezels zijn E-glas. De gemeten dichtheid van de hars [R6] komt het best overeen met de karakteristieke waardes van vinylester volgens [N19], maar het kan ook polyesterhars zijn. De afgeleide lameleigenschappen zijn weergegeven in Tabel 3-4.

*Tabel 3-4: afgeleide lamel-stijfheidseigenschappen blad Reefbrug*

| | | UD | BI | CSM |
|---|---|---|---|---|
| w | [g/m$^2$] | 1200 | 450 | 300 |
| $V_F$ | [-] | 0,37 | 0,35 | 0,2 |
| $E_x$ | [MPa] | 28283 | 16527 | 6807 |
| $E_y$ | [MPa] | 7909 | 16527 | 6807 |
| $G_{xy}$ | [MPa] | 2739 | 2521 | 2641 |
| $v_{xy}$ | [-] | 0,25 | 0,15 | 0,29 |

De laminaatopbouw is op verschillende locaties in het blad gemeten. Deze gegevens zijn verwerkt om een overzicht te creëren hoe de vezels verdeeld zijn op verschillende locaties in het blad. Dit is gedaan door het aantal lagen UD, bi-directionele lamellen en CSM te vermenigvuldigen met de vezelmassa zoals weergegeven in Tabel 3-4. Hiermee is de totale glasvezel massa bepaald. Vervolgens kan het aandeel vezels in elke mat en in elke richting hiermee bepaald worden. Dit is weergegeven in Tabel 3-5.

In de data zoals weergegeven in  zijn enkele patronen herkend:

- Daar waar aan weerszijde van het blad metingen zijn gedaan, is de laminaatopbouw vergelijkbaar. Daarom is als uitgangspunt genomen dat de materiaaleigenschappen in het blad symmetrisch zijn.
- De vezelverdeling van een doorsnede-deel is grotendeels gelijkblijvend over de lengte van het blad. Hierop zijn wat uitzonderingen: in de zone rond de wortel (zone A) is het laminaat rondom meer constant over de doorsnede (de verschillende panelen, i.e. leading edge – trailing edge). In de zone rond de tip (zone H) neemt het percentage UD richting in de spar cap en het trailing panel toe, waar die bij het leading panel en de leading edge afneemt.

*Tabel 3-5: Verdeling vezels in blad Reefbrug*

| | | % massa fractie mat | | | | % massa fractie vezelrichting | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Doorsnede deel | Teststuk | CSM | 0 | 0/90 | ±45 | -45 | 0 | 45 | 90 |
| **L**eading **E**dge | A-**LE**-r | 9% | 74% | 14% | 3% | 4% | 83% | 4% | 9% |
| | B-**LE**-t | 28% | 30% | 38% | 4% | 9% | 56% | 9% | 26% |
| **L**eading **P**anel | B-**LP**-P-t | 8% | 80% | 9% | 3% | 4% | 87% | 4% | 7% |
| | B-**LP**-S-t | 10% | 76% | 11% | 4% | 4% | 84% | 4% | 8% |
| | E-**LP**-P-r | 9% | 78% | 10% | 3% | 4% | 85% | 4% | 7% |
| | H-**LP**-P-t | 33% | 38% | 21% | 7% | 12% | 57% | 12% | 19% |
| **S**par **C**ap | A-**SC**-r | 5% | 87% | 6% | 2% | 2% | 91% | 2% | 4% |
| | B-**SC**-P-t | 5% | 88% | 5% | 2% | 2% | 92% | 2% | 4% |
| | B-**SC**-S-t_1 | 7% | 81% | 8% | 3% | 3% | 88% | 3% | 6% |
| | E-**SC**-P-r | 4% | 89% | 5% | 2% | 2% | 93% | 2% | 4% |
| | H-**SC**-P-t | 5% | 88% | 5% | 2% | 2% | 92% | 2% | 4% |
| **S**hear **W**eb | B-**SW**L-t-inside | 36% | 0% | 64% | 0% | 9% | 41% | 9% | 41% |
| | B-**SW**R-t-inside | 36% | 0% | 64% | 0% | 9% | 41% | 9% | 41% |
| | E-**SW**L-r-outside | 40% | 0% | 60% | 0% | 10% | 40% | 10% | 40% |
| | H-**SW**R-t-outside | 44% | 0% | 56% | 0% | 11% | 39% | 11% | 39% |
| **T**railing **P**anel | B-**TP**-P-t | 24% | 33% | 37% | 6% | 9% | 57% | 9% | 24% |
| | B-**TP**-S-t | 24% | 47% | 24% | 6% | 9% | 65% | 9% | 18% |
| | E-**TP**-P-r | 23% | 36% | 34% | 7% | 9% | 59% | 9% | 23% |
| | H-**TP**-P-t | 14% | 66% | 16% | 4% | 5% | 77% | 5% | 12% |
| **T**railing **E**dge | B-**TE**-P-t-(top) | 25% | 0% | 67% | 8% | 10% | 40% | 10% | 40% |
| | B-**TE**-P-t-(bottom) | 26% | 0% | 67% | 7% | 10% | 40% | 10% | 40% |

Doordat de vezelverdeling per doorsnede-deel over de lengterichting relatief constant blijft, blijven ook de materiaaleigenschappen relatief constant. Hierdoor zijn de materiaaleigenschappen op elke deel van het blad te benaderen door de vezelverdeling van dat doorsnededeel en de dikte van dat doorsnededeel op dat lengtedeel. De resultaten weergeven in Tabel 3-5 zijn dus vertaald naar 6 materialen, voor elk deel van de doorsnede. Dit is gedaan door de gegevens uit Tabel 3-4 in eLamX te verwerken tot een representatieve laminaatopbouw voor dat bladdeel. Voor elk doorsnededeel is de opbouw in zone B genomen voor het bepalen van de materiaalgegevens.

De rekgrenzen voor trek/ druk of afschuiven respectievelijk zijn weer aangenomen als $\varepsilon_{max}$ = 0,6% en $\gamma_{max}$ = 0,8%. De maximaal toelaatbare spanning is vervolgens bepaald als $\sigma_{max} = E * \epsilon_{max}$ en $\tau_{max} = G * \gamma_{max}$. De resulterende laminaateigenschappen zijn weergegeven in Tabel 3-6.

*Tabel 3-6: Laminaat eigenschappen blad Reefbrug per doorsnededeel*

| | LE | LP | SC | SW | TP | TE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_x$ [Mpa] | 14547 | 22212 | 24475 | 12451 | 14579 | 12700 |
| $E_y$ [Mpa] | 11035 | 9082 | 8658 | 12451 | 10459 | 12700 |
| $G_{xy}$ [Mpa] | 2974 | 2935 | 2866 | 2824 | 3076 | 3079 |
| $\sigma_{x,max}$ [MPa] | 87,3 | 133,3 | 146,8 | 74,7 | 87,5 | 76,2 |
| $\sigma_{y,max}$ [MPa] | 66,2 | 54,5 | 51,9 | 74,7 | 62,8 | 76,2 |
| $\tau_{xy,max}$ [MPa] | 23,8 | 23,5 | 22,9 | 22,6 | 24,6 | 24,6 |
| $v_{xy}$ | 0,224 | 0,256 | 0,253 | 0,198 | 0,247 | 0,214 |
| $v_{yx}$ | 0,170 | 0,105 | 0,090 | 0,198 | 0,177 | 0,214 |
| $\rho$ [kN/m$^3$] | 15,4 | 16,3 | 16,6 | 15,2 | 15,4 | 15,4 |

De diktes van elk doorsnededeel op elke lengtedeel zijn weergegeven in Tabel 3-7. De diktes zijn gebaseerd op gemeten of waargenomen waarden.

*Tabel 3-7: Dikte laminaat blad Reefbrug bij elk doorsnede deel op elke lengte deel*

| | LE | LP | SC | SW | TP | TE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Root [mm] | 19.5 | 19 | 19 | 6 | 17 | 11 |
| A [mm] | 19.5 | 18 | 18.5 | 6 | 16.5 | 10.5 |
| B [mm] | 16.25 | 16.5 | 18.5 | 6 | 12.5 | 9.5 |
| C [mm] | 13 | 16.5 | 21.5 | 6 | 9 | 8.5 |
| D [mm] | 13.5 | 17 | 25.5 | 6 | 9 | 7.5 |
| E [mm] | 14 | 15.5 | 28 | 6 | 9 | 6.5 |
| F [mm] | 13.5 | 13.5 | 30.5 | 6 | 8.25 | 5.5 |
| G [mm] | 12 | 12.75 | 32.5 | 6 | 7.5 | 4.5 |
| H [mm] | 10.5 | 12.5 | 29 | 6 | 7.75 | 4 |
| I [mm] | 9.5 | 11.5 | 22 | 6 | 7.5 | 4 |

Tijdens de VO-fase is de stijfheid en sterkte van de leading- en trailing panel in de hoofdrichting getest met coupontesten, zie [R7]. De resultaten van dit onderzoek zijn in hoofdstuk 6 verwerkt tot karakteristieke materiaaleigenschappen en vergeleken met de in het VO aangehouden waarden.

## 3.4 Duurzaamheid

Gemeente Rotterdam voert een breed duurzaamheidsbeleid dat is vastgelegd in het Rotterdams Duurzaamheidskompas en het Rotterdams Klimaatakkoord (2019), gebaseerd op het landelijke klimaatakkoord. De gemeente streeft naar het behalen van de klimaatdoelen van het Parijsakkoord voor 2030 en 2050. Hierbij streeft de gemeente naar een klimaat adaptieve stad die bestand is tegen hitte en wateroverlast, en een verbeterde luchtkwaliteit (Gemeente Rotterdam, www.010duurzamestad.nl).

Het project heeft een groot intrinsiek duurzaam karakter door het hergebruik van de windturbinebladen. Voor elk onderdeel is nagedacht over de duurzaamheid daarvan. Bij de uitwerking van het ontwerp zijn de volgende aspecten van duurzaamheid beschouwd:

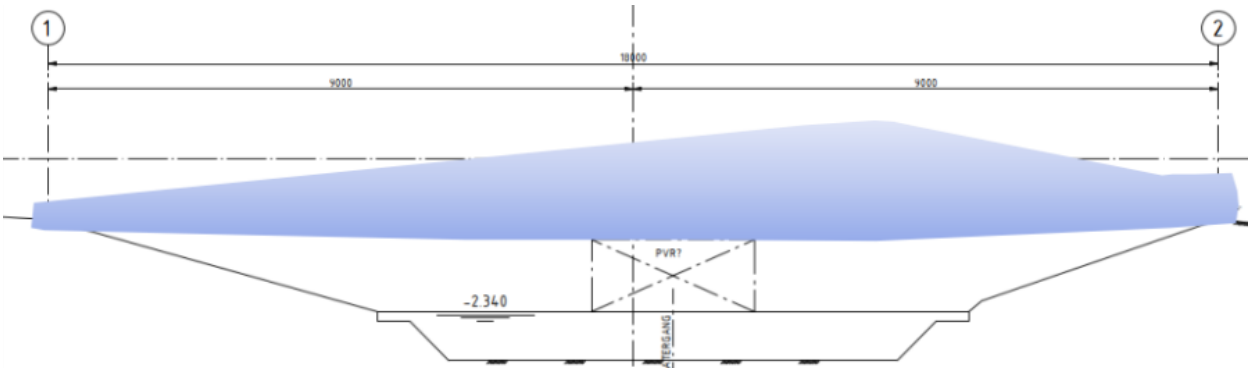
- Circulariteit
    - Hergebruiken van windturbinebladen die voor functie als windturbineblad einde levensduur hebben behaald.
    - Toekomstig hergebruik onderdelen
        - Toepassen van eenduidig deksysteem met flexibilitei.t
        - Losmaakbaarheid van verbindingen.
- Materiaalgebruik
    - Gebruik van materialen met een lange levensduur, die weinig onderhoud vereisen
    - Gebruik van materialen van deels gerecyclede content.
    - Gebruik van recyclebare materialen.
- Biodiversiteit
    - Rekening houden met boomwortels (fundering).

# 4 Variantenstudie

Een variantenstudie is uitgevoerd waarbij per onderdeel varianten verkend zijn op technische haalbaarheid. Dit is gedaan op basis van analytische berekeningen en materiaaleigenschappen zoals bepaald in paragraaf 3.3. Belangrijke onderdelen zijn de hoofddraagconstructie (windturbineblad), de verbinding van het dek met hoofddraagconstructie en het dek.

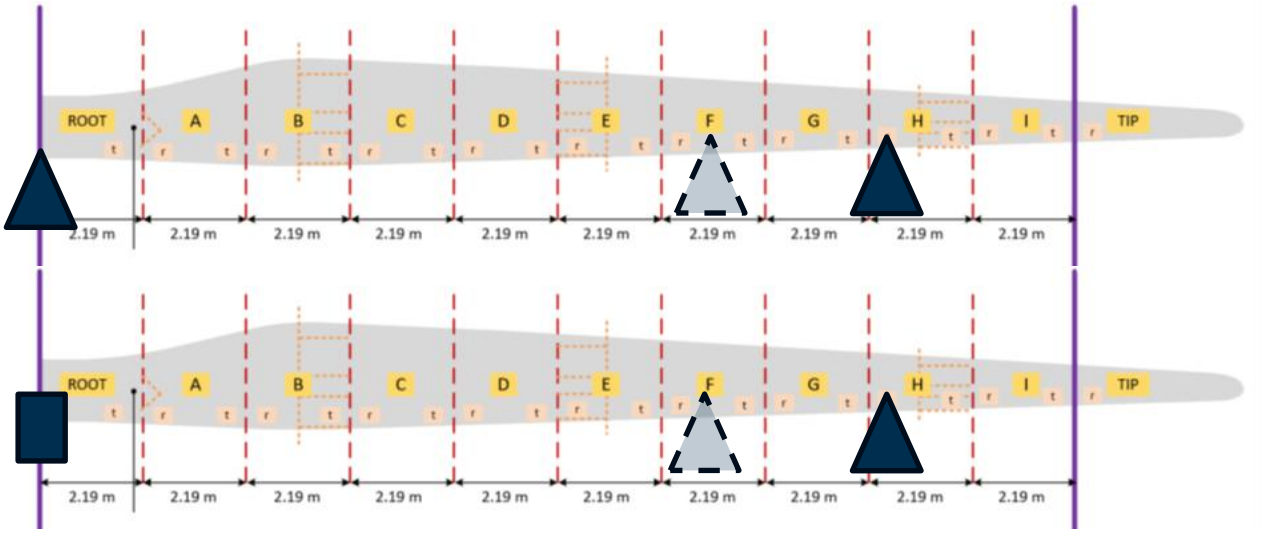
## 4.1 Hoofddraagconstructie

Als startpunt van het VO is het SO genomen uit [R1], weergegeven in Figuur 4-1. Het SO geeft het principe van de brugconstructie weer. Het gaat uit van een totale overspanning van 18 meter, volledig door de bladen gedragen. Dit ontwerp heeft als uitgangspunt dat het oplegging aan wortelzijde indien nodig ingeklemd uitgewerkt kan worden.



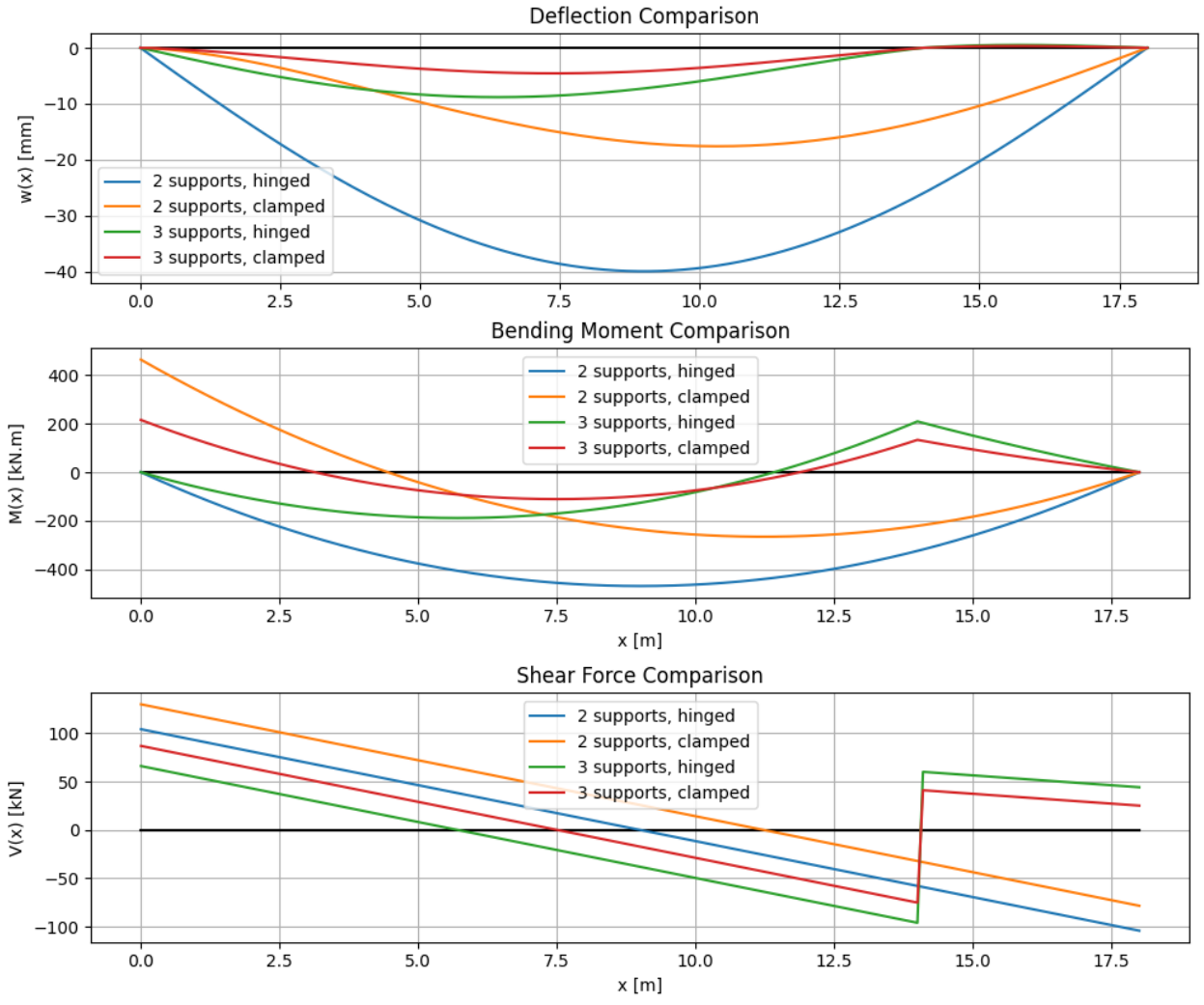

*Figuur 4-1: SO-variant Puur (en/of Kracht op basis van oplegschema).*

Met het SO als basis en met de details van het nieuwe blad zijn er 4 verschillende oplegschema's met een 1D systeem uitgewerkt. Deze 4 varianten hebben een gelijke overspanning van 18m. De 4 varianten zijn een combinatie van de wortel ingeklemd of rotatievrij opleggen en wel/niet toepassen van een tussensteunpunt. Deze 4 varianten zijn weergegeven in Figuur 4-2.




*Figuur 4-2: Varianten 1ste iteratie VO, wortel respectievelijk vrij opgelegd en ingeklemd, met/zonder steunpunt.*

Als 1D analyse zijn deze varianten als een constante balk gemodelleerd. Als doorsnede is de doorsnede tussen snede E en F genomen. Het veld tussen de opleggingen is belast met een verticale gelijkmatig verdeelde last. Voor de varianten met tussensteunpunt is de langste overspanning volledig belast en de kleinere overspanning enkel belast door het eigen gewicht (conservatief voor buigend moment en doorbuiging). De belasting voor de hoofdoverspanning is dus: $q_{hoofd} = 1{,}1 * E.G. + 1{,}2 * \frac{b}{2} * q = 1{,}1 * 3{,}7\,kN/m + 1{,}2 * \frac{2{,}5m}{2} * 5\,kN/m = 11{,}6\,kN/m$ en voor de overige overspanning $q_{zij} = 1{,}1 * E.G. = 1{,}1 * 3{,}7\,kN/m = 4{,}1\,kN/m$ . De bepaling van de doorsnede-eigenschappen van de doorsnede is weergegeven in Bijlage I. De resulterende doorbuiging, buigend moment en dwarskracht van de 4 systemen zijn weergegeven in Figuur 4-3.

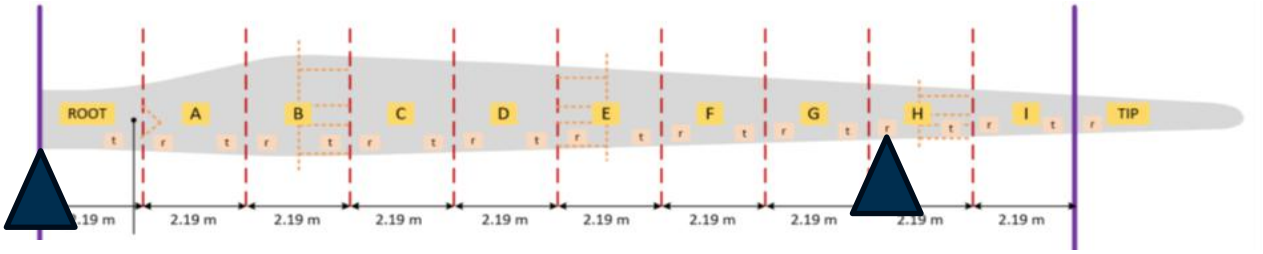



*Figuur 4-3: Resultaten 1D analyse voor 18 m overspanning, wortel rotatievrij en ingeklemd gemodelleerd, met/zonder steunpunt VO Reefbrug*

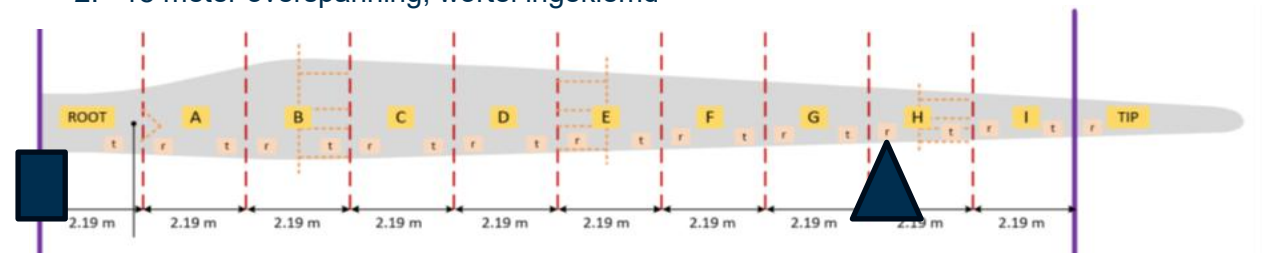
In Bijlage I is een maximale toelaatbare richtwaarde van de doorbuiging van 180 mm, en toelaatbaar buigend moment van 801 kNm en dwarskracht van 1221 kN bepaald. Alle varianten zijn volgens het 1D model voldoende sterk. Door architectonische overwegingen is voorkeur gegeven aan de varianten zonder tussensteunpunt.

De 2 overgebleven constructieve systemen zijn vervolgens met een eindige elementenanalyse (E.E.A.) nader onderzocht. Het model en de volledige uitgevoerde analyse is beschreven in hoofdstuk 5. De gemodelleerde systemen zijn weergegeven in Figuur 4-4.

1. 18 meter overspanning, wortel rotatievrij




2. 18 meter overspanning, wortel ingeklemd




*Figuur 4-4: Gebruikte oplegschema's voor 1ste E.E.A, 18 meter overspanning, wortel rotatievrij en ingeklemd, VO Reefbrug*

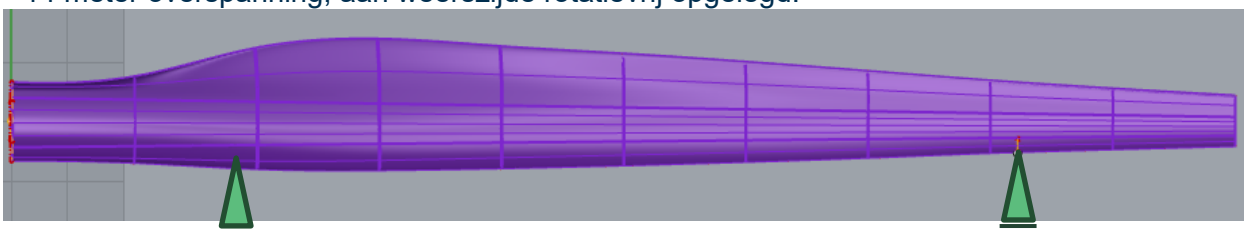
**Variantenstudie eindige elementenanalyse**

Door het uitvoeren van de E.E.A. zijn verder inzichten verkregen in het globale gedrag en lokale respons van de hoofddraagconstructie. Naast een sterkte- en doorbuigingstoets is ook een eigenfrequentie-toets uitgevoerd. Beide varianten bleken te voldoen voor de doorbuiging en eigenfrequentie-toets. Het blad bleek zonder inklemming naar verwachting gevoelig te zijn voor plooi in de drukzone van de overspanning, met een maximaal optredende drukspanning van c.a. 11 MPa en 16 MPa voor respectievelijk de varianten met- en zonder inklemming. De kritieke drukspanning is c.a. 13,7 MPa. De gehele plooitoets is weergegeven in paragraaf 5.7.

Om plooi te voorkomen zou de inklemming voor deze variant met 18 m dus een vereiste worden. Om die reden is ervoor gekozen om opnieuw opties te verkennen met kleinere overspanning, d.w.z. met een tussensteunpunt, om te bepalen of de constructie met een kleinere overspanning geen inklemming nodig heeft door de drukspanning voldoende te reduceren.

Met de derde variant wordt de hoofd-overspanning ingekort tot 14 meter. Dit wordt gerealiseerd door de oplegging aan de wortelzijde 4 meter te verschuiven. De opleggingen aan beide zijden wordt rotatievrij uitgevoerd. Deze variant is weergegeven in Figuur 4-5. In deze variant wordt de dekconstructie aan de uiteinden afwijkend uitgevoerd, om opwippen van de voegen te voorkomen. Het resultaat van deze variant is weergegeven in hoofdstuk 5.

14 meter overspanning, aan weerszijde rotatievrij opgelegd.



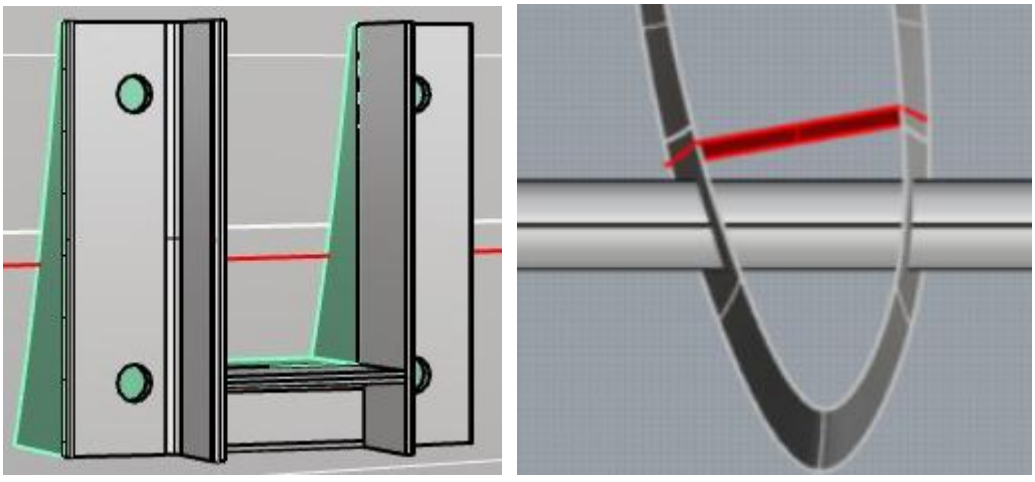
*Figuur 4-5: VO-variant 3, hoofdoverspanning van 14 meter, rotatievrij opgelegd.*

Met deze variant is de drukspanning (plooiwaarde) gereduceerd met c.a. 25% tot 12 MPa. Dit is lager dan de richtwaarde van 13,7 MPa. Het verschil is gering, en plooi is een aandachtspunt in de DO-fase. Indien nodig zal lokaal in de kwetsbare zone een versterking toegepast worden.

## 4.2 Verbinding dekconstructie met hoofddraagconstructie

Voor de verbinding van de dekconstructie met de hoofddraagconstructie is er in hoofdlijnen naar 2 varianten onderzoek gedaan. Deze 2 varianten zijn weergegeven in Figuur 4-6, waarbij:

- Variant 1: Boutverbinding, met opvulling tussen kopplaat en windturbine ligger en een toevoeging in wand of binnenin de ligger voor vastdraaien bout en opnemen normaalkracht.
- Variant 2: Door-en-door buisverbinding, waarbij een buis door de volledige breedte van de ligger wordt doorgevoerd. Dit wordt gerealiseerd door aan weerszijden het blad een gat te boren, te verstevigen en vervolgens een buis hierin te monteren.



*Figuur 4-6: Opties verbinding; respectievelijk boutverbinding (beugel weergegeven) en buisverbinding*

De uitdagingen van de verbindingen zijn voornamelijk:

- De hoogte van de positie van het dek en daarmee de positie van de verbinding; voor de inpassing in omgeving van de brug heeft het veel voordelen als het dek laag gepositioneerd kan worden. Het nadeel van het laag positioneren van de verbinding is de verminderde capaciteit in dat deel van de constructie (leading edge).
- Uitvoering; doordat de doorsnede van de windturbineligger inwendig een krappe gesloten ruimte is, zal de verbinding vanuit buiten het blad gerealiseerd moeten worden. Doordat de verbinding van buiten het blad gerealiseerd moet worden en niet zichtbaar is van buiten waar de shear webs zich bevinden, moet de verbinding voldoende marge hebben om toleranties en blad onnauwkeurigheden op te kunnen vangen.
- Sterkte en de onzekerheden zowel in materiaaleigenschappen als positionering. De onzekerheid in materiaaleigenschappen betekenen dat wat grotere marges en toleranties gehanteerd worden.

Een boutverbinding is een gangbaardere constructie dan de buisverbinding. Door architectonische voorkeur om de verbinding zoveel als mogelijk onder de shear webs te positioneren, is er voorkeur voor de boutverbinding, omdat deze kleinere gaten heeft met kleinere samenhangende randafstanden. De buisverbinding vereist een groot gat, dat mogelijk conflicteert met de shear web-positie. De boutverbinding zal voor het DO ook verder onderzocht worden met ondersteunende sterkte testen en onderzoeken in het lab van de TU Delft. De toetsing van het VO-ontwerp, gebaseerd op variant 1, met ingeschatte sterktewaarde, is weergegeven in paragraaf 5.8.

## 4.3 Dekopbouw

Voor de dekconstructie zijn er in hoofdlijnen 3 varianten onderzocht.
Deze zijn:

- Dek overspannend korte afstand in lengte richting brug (tot c.a. 3 m).
- Dek overspannend korte afstand in breedte richting brug (tot c.a. 3.5 m).
- Dek overspannend lange afstand in lengte richting brug (tot c.a. 9 m).

Verschillende variaties in overspanning van het dek zijn bekeken omdat:

- De verbinding van de dwarsdrager met het blad moeilijk aan te brengen is en daardoor duur is.
- De draagkracht van de het blad voor de verbinding dicht bij het tip van het blad geringer is.

Door het dek langer te laten overspannen zou een enkele verbinding(groep) in het midden van de overspanning voldoende kunnen zijn. Bekeken wordt wat de vereiste capaciteit van de verbinding is.

Binnen de bovengenoemde groepen zijn er verschillende opbouwen onderzocht. De zone van het windturbine blad waaraan de dwarsbalken bevestigd worden is niet voorbereid of ontworpen op een lokale krachtsinleiding. De sterkte van de verbinding is daardoor maatgevend voor de uitvoering van de verbinding en het aantal verbindingen. Door zijn locatie is er op de brug geen onbedoeld verkeer te verwachten en dit wordt tevens uitgesloten door een blokkerende maatregel (paaltje o.i.d.). De brug hoeft alleen ontworpen te worden op voet-fietsverkeer.

Verschillende dekken zijn toepasbaar. De onderzochte opties voor de korte overspanning zijn:

- VVK sandwichpaneel.
- VVK pultrusie-paneel.
- Houten planken.

Uiteindelijk is door het ingenieursbureau Rotterdam vanwege de positieve ervaringen, verwachte lange levensduur en het geringe onderhoud de voorkeur geuit gekozen voor een VVK-dek uit sandwichpanelen. In het ontwerp is gerekend met standaard materialeneigenschappen voor glasvezelversterkte kunststof. In de definitieve uitvoering kan een duurzaam harssysteem met gerecycled PET- en biogrondstoffen overwogen worden. In de detaillering van de bevestigingen wordt rekening gehouden met toekomstig hergebruik, zodat de lange levensduur benut kan worden, en toekomstig hergebruik van het dek mogelijk is.

Voor de overspanning van het dek in de lengte richting is een VVK-sandwich dek liggend op een dwarsbalk de meest voor de hand liggende optie. Ook voor een overspanning in breedte-richting is enkel een sandwichpaneel onderzocht. Deze wordt niet opgelegd op een dwarsbalk maar zou door middel van een montageconstructie direct aan de windturbineligger worden gemonteerd.

Bij het uitwerken van de lange overspanning bleken de krachten op de verbinding dusdanig groot dat het uitwerken van deze verbinding zeer ingewikkeld bleek. Een kleinere overspanning heeft geringere belasting op de verbinding en is beter mogelijk. Om de verbinding aan te kunnen brengen is een blindverbinding, zoals een Rampa-moer of een splijtbout het eenvoudigst. De draagkracht hiervan is echter beperkt.

De beoogde overspanning van het dek wordt gesteld op c.a. 2 meter. Voor dwarskracht in de verbinding is deze overspanning haalbaar met de relatief dunne VVK dekpanelen. De dwarsbalken zijn rotatievrij bevestigd aan het uiteinde. Door de excentriciteit van de boutverbinding ten opzichte van het steunpunt zal de bovenste boutrij ook trekkracht op moeten nemen. In paragraaf 5.8 wordt verder ingegaan op het benodigde aantal bouten.

Het toepassen van een dek op dwarsliggers is ook goed voor de (de-)monteerbaarheid. De leuning kan hierbij zowel zijdelingse richting gemonteerd kunnen worden in het sandwichpaneel of via een randbalk op de dwarsbalken.

# 5 Constructieve beschouwing VO

In dit hoofdstuk is de constructieve beschouwing van het VO gerapporteerd. Het doel van deze analyse is het technisch onderbouwen van het VO. Hierbij ligt de nadruk op het ondersteunen van de te maken keuzes op basis van een selectie van belastinggevallen die maatgevend zijn voor de hoofdafmetingen en belangrijke details. Het uitvoeren van een complete toetsing conform de Eurocode is onderdeel van het DO.

De berekening van de globale constructie is uitgevoerd met een eindige elementenanalyse (E.E.A). Allereerst is het 3D eindige elementenmodel toegelicht (E.E.M.). Daarnaast zijn de relevante lasten voor het project en de selectie daarin voor het VO beschreven. Daarna zijn als onderdeel van het VO de volgende toetsen uitgevoerd:

- Globale sterkte toets.
- Globale doorbuiging.
- Eigenfrequentie analyse.

Analytisch zijn de volgende onderdelen behandeld:

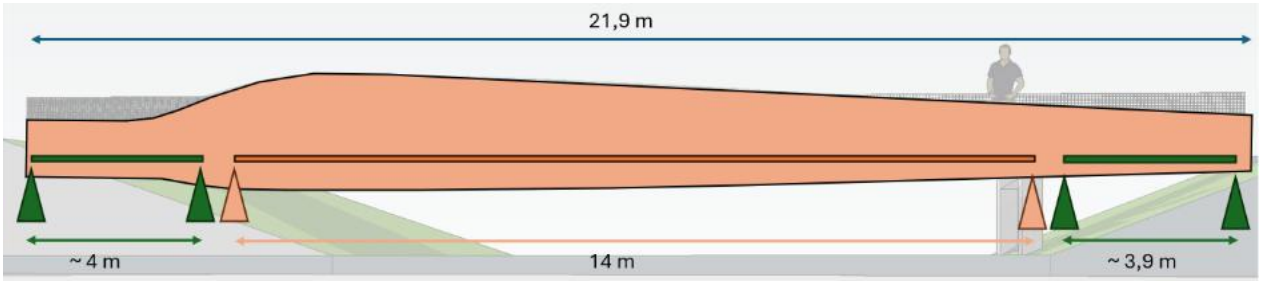
- Lokale stabiliteit drukzone.
- Verbindingen dek – windturbine bladen.
- Detaillering dwarsdragers, dek, randbalk van het dek en de leuning.
- Reactiekrachten.

## 5.1 Constructief principe

De hoofddraagconstructie van de brug bestaat uit twee naast elkaar gelegen einde leven-windturbinebladen, van het type NM52/900 met daartussen een dek. De afmetingen van de hoofdoverspanning bedragen c.a. 14m x 2.5m (L x B). Het totale dek zal ongeveer 21,9 meter lang zijn, even lang als de windmolenbladen.

De hoofddraagconstructie van het VO is de uitgewerkte versie van variant 3, zoals beschreven in paragraaf 4.1. De windturbine zullen op 2 punten rotatievrij worden opgelegd. De opleggingen worden ontworpen in de vorm van een zadel aan de onderzijde van het blad. De bestaande landhoofden dienen hiervoor aangepast te worden en de bestaande tussensteunpunten worden verwijderd. Nieuw tussensteunpunten en landhoofden worden aangebracht.

In Figuur 5-1 is het mechanische systeem van het VO geschematiseerd. Het windturbine blad is in licht oranje weergegeven, rotatievrij opgelegd aan weerszijden van de overspanning en translatie vrij aan 1 zijde. Het dek tussen deze opleggingen is als horizontale lijn in donkerder oranje weergegeven en zal afdragen op de bladen. Vanaf het landhoofd tot aan de opleggingen worden aan beide zijden losse aanbruggen toegepast, weergegeven in groen.




*Figuur 5-1: Schematischte mechanisch systeem VO Reefbrug*

De aanbruggen zijn op zichzelf dragende constructies, die niet afdragen op de bladen maar op de steunpunten en de landhoofden.

## 5.2 Eindige elementenmodel

Een eindige elementenanalyse is uitgevoerd met SoFiSTiK versie 2024. In deze analyse is de geometrie bepaald zoals in paragraaf 5.2.1 beschreven. De geometrie is opgesteld met Rhinoceros 3D, versie 8. Het verwerken van de puntenwolk data naar model is gedaan met Grasshopper.

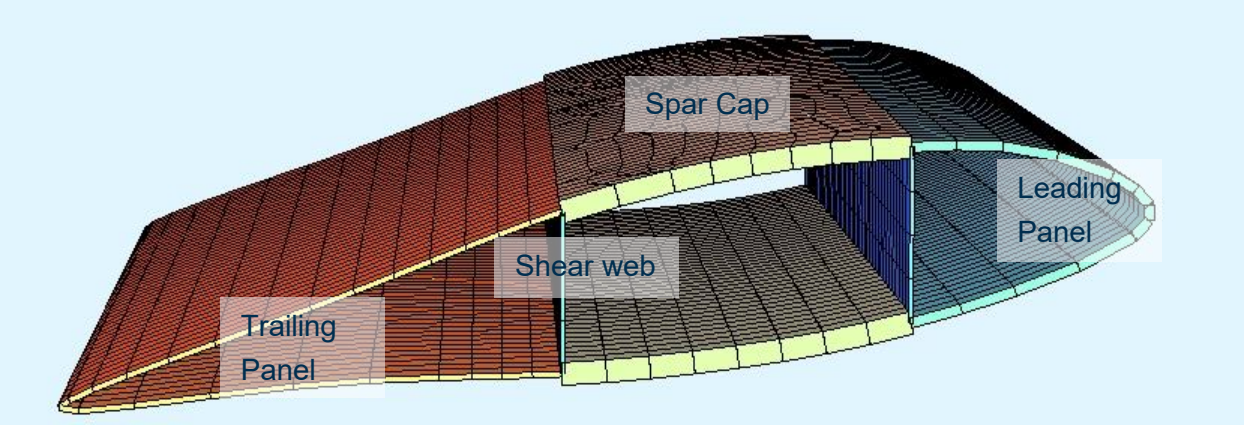
### 5.2.1 Geometrie

De geometrie van het eindig elementen model is gebaseerd op een 3D scan van een van de bladen. Deze scan is vertaald naar een puntenwolk. Door de puntenwolk is de vorm van het blad accuraat vastgelegd. Het nadeel van deze puntenwolk is de grootte van het bestand. De scan bevat c.a. 1 miljoen punten, wat de analyse significant vertraagd. Bovendien is het nog geen samenhangend oppervlak. Hierom is ervoor gekozen om het model te simplificeren. Dit is gedaan door nominale doorsnedes te maken, deze te vereenvoudigen naar een continue lijn waar vervolgens weer vlakken van gemaakt zijn.

De geometrie die hierdoor gecreëerd wordt, is bij benadering gelijk aan de gemeten constructie. Het voordeel van deze versimpeling is dat het aandeel punten verkleind is van c.a. 1 miljoen naar c.a. 50.000. Hiernaast is de vorm nu te vangen in een bijna volledig uniforme maas, zonder gaten. Hierbij is de doorsnede indeling zoals weergegeven in Figuur 3-2 verloren. Voor het VO is het voldoende om de verdeling te simplificeren als losse panelen die door de shear webs verdeeld worden in 4 delen, namelijk:

- **L**eading **P**anel
- **S**par **C**ap
- **S**hear **W**ebs
- **T**railing **P**anel

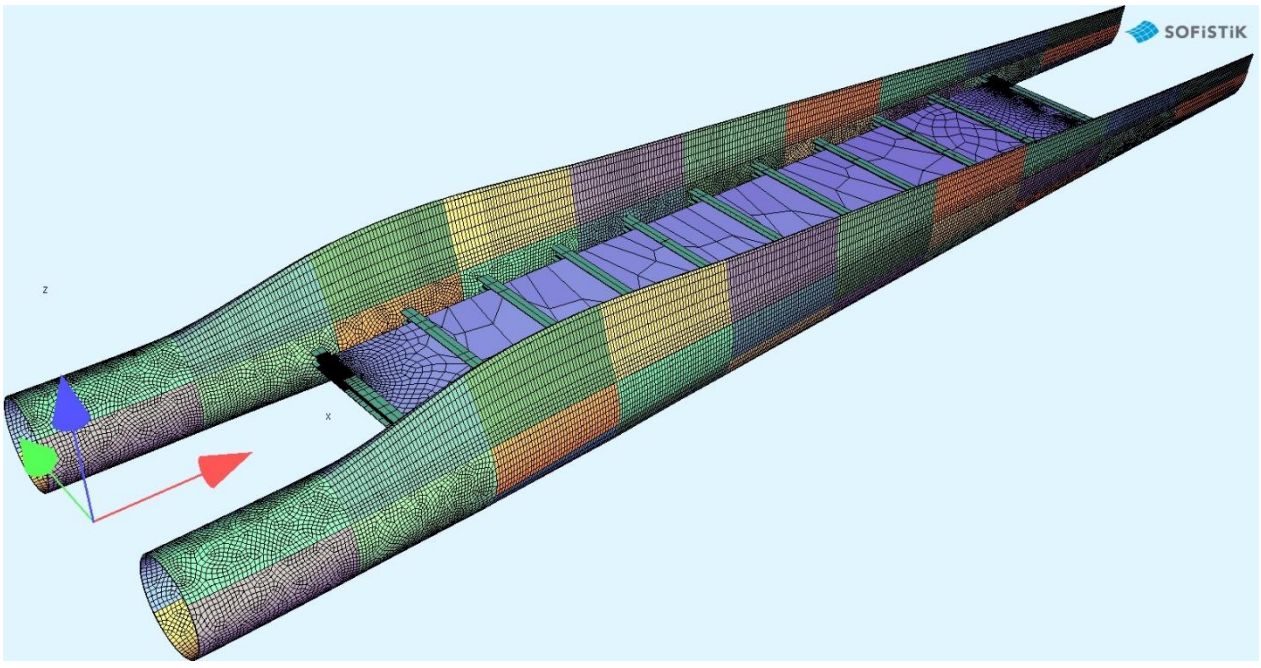
De trailing edge en leading edge zijn gecombineerd met het leading panel en trailing panel.
De doorsnede van het blad (lengtedeel F) is weergegeven in Figuur 5-2.




*Figuur 5-2: Doorsnede windturbineligger, lengtedeel F, VO Reefbrug*

### 5.2.2 Model

Het model van de E.E.M.-analyse is afgeleid van de 3D geometrie. De constructie-elementen van het windturbineblad zijn gemodelleerd als schaalelementen. Het model van de Reefbrug is compleet gemaakt met het toevoegen van dwarsbalken, dek en steunpunten. Een overzicht van het 3D model is weergegeven in Figuur 5-3.




*Figuur 5-3: Overzicht 3D E.E.M. model VO Reefbrug, kleuren geven unieke groepen weer.*

Voor het VO is het dek gemodelleerd als een simpele plaat die enkel afdraagt op dwarsdragers. De dwarsdragers zijn gemodelleerd als lijnelementen, waarbij de einden van de lijnen de intersecties zijn met het binnen oppervlak van het blad. De verbinding van de dwarsdragers op de bladen zijn gemodelleerd als scharnierend. Deze manier van modelleren resulteert in onrealistische spanningspieken rond deze verbinding; hier is bij de toetsing rekening mee

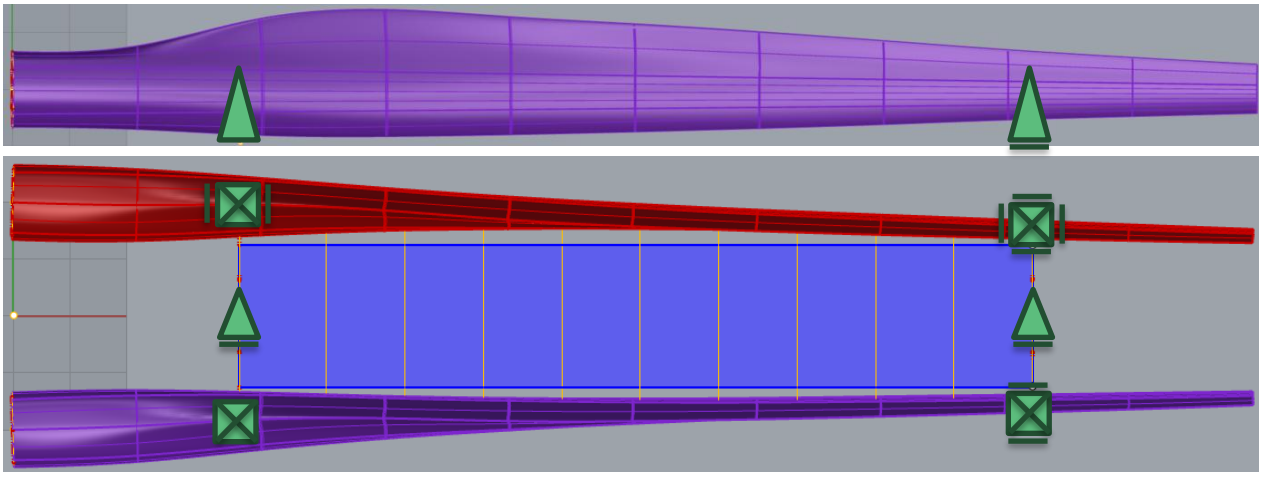
gehouden.

Voor de opleggingen van de bladen zijn lijnelementen gemodelleerd, die de vorm van het blad volgen. Deze lijnelementen zijn gekoppeld aan punten, waarop de oplegrandvoorwaarden zijn aangebracht. Voor de laterale stabiliteit van model zijn de eerste en laatste dwarsdrager vastgehouden in dwarsrichting. Het rapport van het E.E.A is bijgevoegd in Bijlage II.

In het model is enkel gebruik gemaakt van de in paragraaf 3.3.2 bepaalde laminaat eigenschappen en S355 conform paragraaf 3.3.1. Het dek bestaat uit 10 mm dik staal, waarbij het eigengewicht hierbij nagenoeg overeenkomt met het voor het VO geselecteerde dek gewicht. (10 mm staal = 78.5 kg/m$^2$, dek = 65 kg/m$^2$, slijtlaag = 15 kg/m$^2$, dus totaal dek = 80 kg/m$^2$). De stijfheid van het stalen dek heeft gering invloed op de globale constructie (met 10% van de stijfheid wordt de eigenfrequentie met 0,02Hz verlaagd), dus dit effect wordt verwaarloosd. De dwarsdragers zijn gemodelleerd als HEA 140 balken.

### 5.2.3 Randvoorwaarden

De opleggingen zijn gemodelleerd zoals hierboven beschreven. De steunpunten bij de wortel zijn dusdanig gemodelleerd dat het systeem statisch bepaald is in zowel langs- als dwarsrichting. Door de vorm van het blad zal door een verticale last horizontale vervorming in dwarsrichting plaatsvinden. Om voor stabiliteit te zorgen wordt de constructie voor het VO-model horizontaal vastgehouden bij de eerste en laatste dwarsdrager. Het oplegsysteem is weergegeven in Figuur 5-4.



*Figuur 5-4: Oplegsysteem VO Reefbrug, zijaanzicht.*

In het DO-ontwerp wordt de definitieve oplegging uitgewerkt. Zoals is weergegeven in zowel Figuur 5-3 als Figuur 5-4 is het dekdeel van het landhoofd tot steunpunten niet gemodelleerd. Dit dekdeel is zelfdragend en is apart analytisch getoetst, zie paragraaf 5.7.1.

## 5.3 Belastingen

### 5.3.1 Belastingsgevallen

In Tabel 5-1 is een overzicht gegeven met de Eurocode-belastingen voor de Reefbrug, afkomstig uit [N9] en [N10], zie ook [R4] paragraaf 5.3. Voor de VO-toetsing is een selectie van belastingsgevallen toegepast, toegelicht onder onderstaande tabel.

*Tabel 5-1: Relevante belastingen voor de Reefbrug, belastingen uit [N9] en [N10].*

| Belasting | Karakteristieke waarde | Opmerking |
|---|---|---|
| Eigen gewicht | $G_{tot}$ = 4.2 ton | Volumieke massa van shellelementen geschaald dat totale massa blad gelijk is aan theoretische waarde. |
| Gelijkmatig verdeelde belasting | $q_{fk} \approx 4{,}75$ kN/m² | Alleen toegepast op ongunstigste delen van de constructie |
| Horizontale belasting | 0,45 kN/m² (10% van verticale belasting) | Werkt in overspanningsrichting en gelijktijdig met verticale belasting |
| Geconcentreerde belasting | 7 kN op 0,1 × 0,1 m² | Puntbelasting alleen voor toetsing dek |
| Voertuigen | Niet van toepassing | Obstakels verhinderen voertuigen op brug |
| Belasting leuningen | 1,0 kN/m (lijnlast) | Horizontaal (loodrecht) én verticaal op leuning |
| Windbelasting (y-richting) | 4,15 kN/m | Gebaseerd op $q_b$ = 0,645 kN/m², $c_{fx}$ = 1,3 |
| Windbelasting (z-richting) | 3,33 kN/m | Excentriciteit e = 1,325 m |
| Sneeuwbelasting | Niet maatgevend | Niet maatgevend. Lagere waardes dan gebruiksbelasting, |
| Temperatuur (uniform) | $\Delta T_{exp}$ = +36°C, $\Delta T_{krimp}$ = −38°C | Gebaseerd op $T_{e,max}$ = 46°C en $T_{e,min}$ = −28°C |
| Temperatuur (lineair verticaal) | $\Delta T_{m,heat}$ = 18 °C, $\Delta T_{m,cool}$ = 13°C | $k_{sur}$ = 1,6 (boven warmer), $k_{sur}$ = 0,6 (onder warmer) |

Van de hierboven benoemde belastingen zijn voor het VO de volgende belastinggevallen beschouwd als maatgevend en getoetst, in combinatie met het eigengewicht:

- Gelijkmatig verdeelde belasting
- Daarbij behorende horizontale belasting
- Geconcentreerde belasting (enkel ten behoeve van de dekconstructie/verbinding)
- Leuningbelasting (enkel ten behoeve van de leuning/dekconstructie-verbinding)

### 5.3.2 Belastingcombinaties

Belastingfactoren zijn toegepast conform [N2] tabel NB.16 – A2.4(B), zoals is weergegeven in Tabel 5-2.

*Tabel 5-2: Belasting factoren CC1 constructie*

| Gevolg-klasse | Blijvende belasting | | | Veranderlijk | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ongunstig ($\xi$)$\gamma_{G,j,sup}$ | | Gunstig $\gamma_{G,j,inf}$ | Verkeer $\gamma_{Q,i}$ | Overig veranderlijk $\gamma_{Q,i}$ |
| | 6.10 a | 6.10 b | | | |
| CC1 | 1.2 | 1.1 | 0.9 | 1.2 | 1.35 |

ψ-factoren zijn toegepast conform [N2] tabel NB.13 – A2.2, zoals is weergegeven in Tabel 5-3. Voor kruip, waar ook $\Psi_2$ wordt gebruikt, is onderstaande tabel niet van toepassing; kruip wordt niet getoetst.

*Tabel 5-3: Partiele factoren fiets- en voetgangersbrug*

| Belasting | Symbool | | $\Psi_0$ | $\Psi_1$ | $\Psi_2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Verkeersbelasting | gr1 | Gelijkmatig verdeelde belasting $q_{fk}$ | 0,4 | 0,8 | 0,4 |
| | | Horizontale belasting $q_{flk}$ | 0,4 | 0,8 | 0 |
| | Geconcentreerde belasting $Q_{fwk}$ | | 0 | 0,8 | 0 |
| Windkrachten | $F_{wk}$ | Blijvende ontwerpsituatie | 0,3 | 0,6 | 0 |
| | | Uitvoering | 0,8 | 0 | 0 |
| Thermische belasting | $T_k$ | | 0,3 | 0,8 | 0,3 |
| Belasting tijdens bouw | $Q_c$ | | 1,0 | 0 | 1,0 |

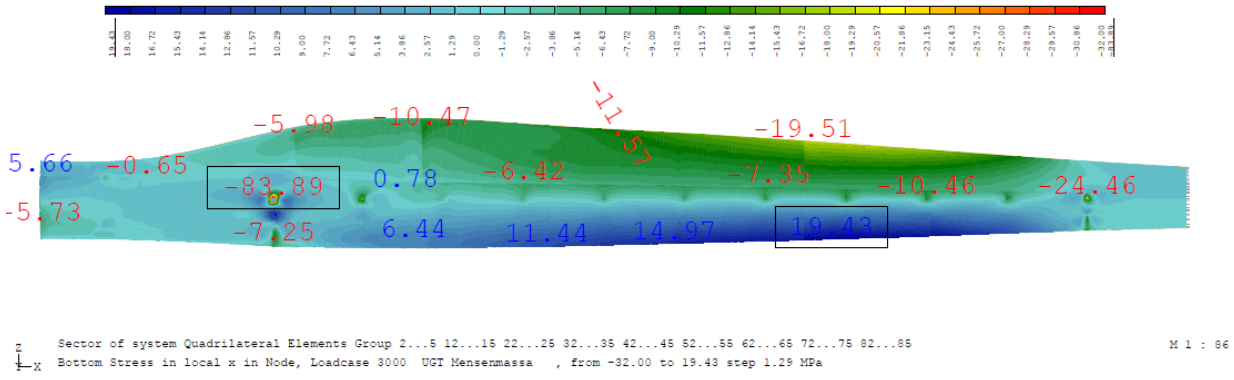
Combinatie-regels zijn toegepast conform [N2] tabel NB.15 – A2.4(B), zoals is weergegeven in Tabel 5-4.

*Tabel 5-4: Combinatie regels voor belastingen op fiets- en voetgangersbruggen*

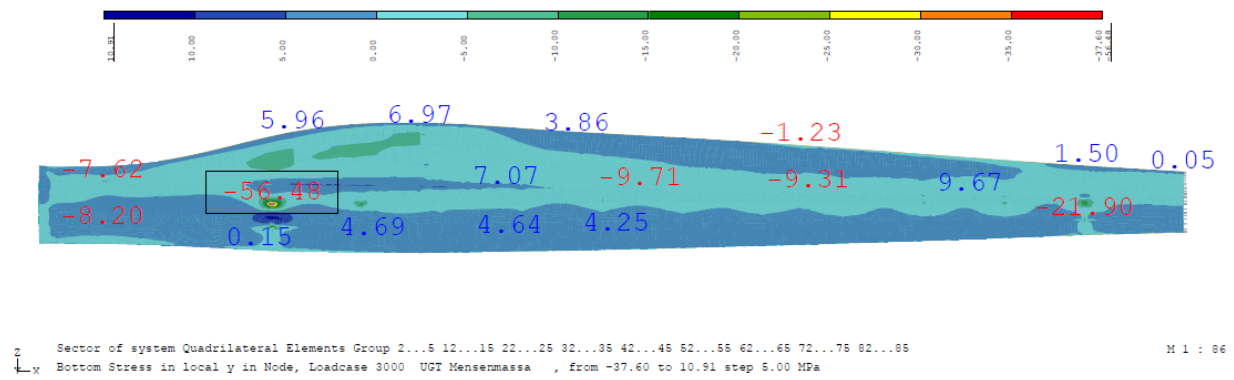
| Ontwerp situaties | Blijvende belasting | | Overheer-sende belasting | Tegelijkertijd optredende veranderlijke belasting | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Ongunstig | Gunstig | | Belangrijkste | Andere |
| 6.10 a | $\gamma_{G,j,sup} * G_{k,j,sup}$ | $\gamma_{G,j,inf} * G_{k,j,inf}$ | | $\Psi_{0,1} * \gamma_{Q,1} * Q_{k,1}$ | $\Psi_{0,i} * \gamma_{Q,i} * Q_{k,i}$ |
| 6.10 b | $\xi\gamma_{G,j,sup} * G_{k,j,sup}$ | $\gamma_{G,j,inf} * G_{k,j,inf}$ | $\gamma_{Q,1} * Q_{k,1}$ | | $\Psi_{0,i} * \gamma_{Q,i} * Q_{k,i}$ |

## 5.4 Sterktetoets windturbineligger

De spanningstoets is conform [N19] (6-6) op laminaatniveau uitgevoerd. Voor een enkele ligger zijn de spanningen in de lokale x en y-richting aan de buitenzijde van het laminaat weergegeven in respectievelijk Figuur 5-5 en Figuur 5-6. Hierin is zichtbaar dat de spanningen in de lokale x-richting maximaal zijn in de buitenzijde van de liggers en er zijn spanningspieken rond de dwarsbalken. Zoals eerder benoemd zijn deze lokale spanningspieken een gevolg van de modellering van de dwarsbalken. De spanningen rond de verbindingen worden daarom apart analytisch getoetst. In de figuren de piekspanningen weggelaten en is de maximale spanningslimiet in de weergave verminderd tot de getoetste waarde (32,0 en 37,6 MPa respectievelijk), om zo beter het globale gedrag van de gehele ligger weer te geven.




*Figuur 5-5: Spanningen in lokale x-richting, buitenzijde laminaat, weergave van spanningen gelimiteerd tot -32,0 MPa, VO Reefbrug*




*Figuur 5-6: Spanningen in lokale y-richting, buitenzijde laminaat, weergave van spanningen gelimiteerd tot -37,6 MPa, VO Reefbrug*

Het aangehouden criterium is weergegeven in Formule 5-1. Voor het VO is per materiaal, de omhullende spanningen uitgelezen uit SoFiSTiK. De omhullende spanningen en daarbij horende uitnuttingsgraad zijn weergegeven in Tabel 5-5. De volledige uitvoer van resultaten is opgenomen in Bijlage II.

*Formule 5-1: Spanningscriteria CUR 6.2.2 (6-6) op laminaat niveau*

$$\left(\frac{\sigma_{i,Ed}}{f_{i,Rd}}\right) \leq 1{,}0 \text{ én } \left(\frac{\tau_{kl,Ed}}{\tau_{kl,Rd}}\right) \leq 1{,}0$$

*Tabel 5-5: Omhullende spanningen en daarbij horende uitnuttingsgraad (UC) VO Reefbrug*

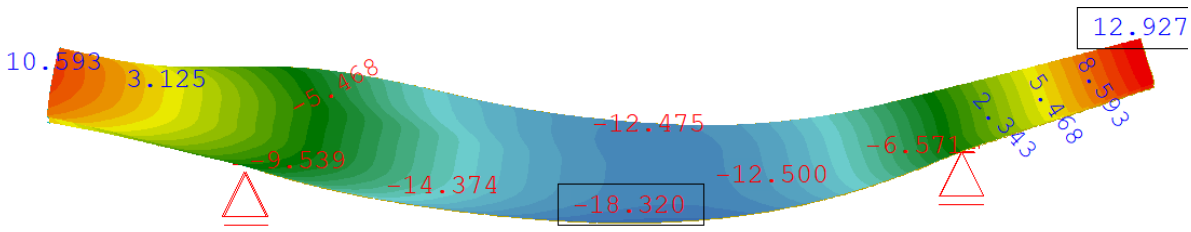
| Doorsnede deel | $\lvert\sigma_x\rvert$ [MPa] | u.c. | $\lvert\sigma_y\rvert$ [MPa] | u.c. | $\lvert\tau_{xy}\rvert$ [MPa] | u.c. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **L**eading **P**anel | 20.8 | 0.16 | 12.7 | 0.23 | 7.4 | 0.31 |
| **S**par **C**ap | 32.0 | 0.22 | 37.6 | 0.72 | 5.8 | 0.25 |
| **S**hear **W**eb | 5.8 | 0.08 | 13.1 | 0.18 | 4.4 | 0.19 |
| **T**railing **P**anel | 19.2 | 0.22 | 7.6 | 0.12 | 4.8 | 0.20 |

In de figuren zijn duidelijk de spanningspieken rond de steunpunten en dwarsbalken zichtbaar. Deze zijn uit de toetsing gehaald door de elementen direct omliggend van deze punten en lijnen niet mee te nemen. De invloed van deze elementen toch in zekere maat meegenomen in de toetsing. Dit is voornamelijk zichtbaar in de spar cap, waar in de figuur duidelijk zichtbaar is dat de spanningen in beide lokale richtingen gering zijn, maar in bovenstaande tabel toch een hoge uitnuttingsgraad van 0,72 gedocumenteerd is. Dit heeft verder geen invloed op de conclusie van de globale toetsing van de windturbine ligger. Globaal genomen wordt de windturbineligger relatief licht belast. Uit alle uitnuttingsgraden, zoals in de tabel hierboven weergegeven, voldoet de constructie globaal op sterkte.

## 5.5 Verplaatsing

### 5.5.1 Globaal

Er is een richtwaarde gehanteerd voor de maximale toelaatbare doorbuiging onder veranderlijke belasting van L/100 van de overspanning. De globale doorbuiging is ook uit SoFiSTiK uitgelezen en is weergegeven in Figuur 5-7.




*Figuur 5-7: Doorbuiging Reefbrug door veel voorkomende belastingscombinaties*

In bovenstaande figuur is zichtbaar dat de maximale doorbuiging 18,3 mm bedraagt. De maximaal toelaatbare doorbuiging, L/100, is 140 mm. De uitnuttingsgraad voor doorbuiging is dus:
$u.c. = \frac{18{,}3\ mm}{140\ mm} = 0{,}13.$

Voor het PVR hoeft geen doorbuiging meegenomen te worden. Hier is dan ook geen verdere controle op uitgevoerd.

### 5.5.2 Leuning

De leuning is door de architect ontworpen als een stalen rooster paneel, gemonteerd op een stalen randbalk. Deze randbalk draagt direct af op de dwarsbalken. Zie paragraaf 5.7.1 voor de visualisaties. Ten behoeve van een veilig gevoel bij gebruik van de brug wordt de maximale horizontale vervorming van de leuning gelimiteerd tot 20mm, [N2] art. A1.4.3. Onderdeel van deze vervorming is:

- Torderen van de randbalk
- Vervorming van de leuning

De detaillering van de leuningconstructie wordt verder behandeld en beschreven in hoofdstuk 5.7.1. Voor de berekening van de vervorming is als eerste de horizontale uitwijking ten gevolge van het torderen van de randbalk bepaald. Voor de randbalk is een stalen profiel PFC200x90x30 gebruikt. De vervorming van de randbalk zorgt voor een horizontale uitwijking van 6,9 mm boven in de leuning.

De leuning mag dus nog maximaal 13,1 mm buigen. De leuning zijn roosters met stijlen van 40x3 mm met 50x50 mm maasgrootte. De horizontale buiging van dit rooster is 5,0 mm.

De totale horizontale uitwijking van de leuning is dus 6,9 mm + 5,0 mm = 11,9 mm. De volledige analyse is toegevoegd in Bijlage IV. De uitnuttingsgraad is dus:

$$u.c. = \frac{11{,}9\ mm}{20\ mm} = 0,60$$

## 5.6 Trillingen

Voor de toetsing op trillingen is er in SoFiSTiK een eigenfrequentie-analyse uitgevoerd. Deze in eerste instantie zonder toegevoegde belasting uitgevoerd. De laagste eigenfrequenties zijn weergegeven in Tabel 5-6.

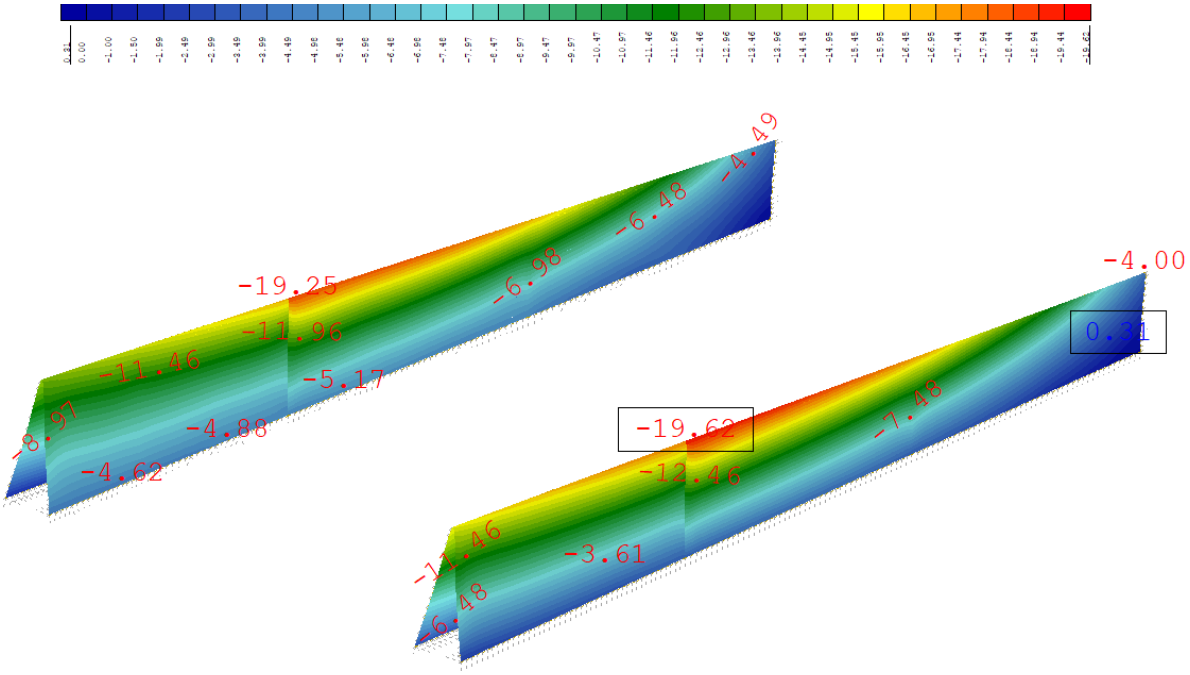
*Tabel 5-6: Eigenfrequenties Reefbrug door eigen gewicht*

| Richting | Laagste eigenfrequentie | Kritieke frequenties |
|---|---|---|
| Verticaal | 5.64 Hz | 1 tot 5 Hz |
| Horizontaal | 4.92 Hz | 0,5 tot 1,2 Hz |

Zoals in de tabel die hierboven weergegeven zit de laagste eigenfrequentie voor zowel horizontale als verticale trillingen ver boven de 5Hz, dus buiten de mogelijk kritieke aanstootfrequenties. Voor het VO is het vanwege de marge op de eigenfrequenties niet relevant om de belasting afkomstig van de “Traffic Class” toe te voegen. Conform [R4] is er geen toetsing nodig op de optredende versnelling.

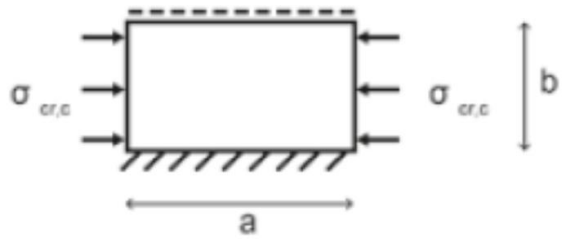
## 5.7 Lokale stabiliteit

Door vorm van blad en oplegging schema ontstaat een drukzone in staart van blad. De staart van het blad bestaat uit relatief dunne wanden, die gevoelig zijn voor plooi. Voor het VO wordt een eerste inschatting gemaakt in welke maten de wanden gevoelig zijn voor plooi. Hiervoor zijn de spanningen uitgelezen uit SoFiSTiK, weergegeven in Figuur 5-8. De volledige berekening is meegeleverd in Bijlage III.




*Figuur 5-8: Spanningen in staartzone blad Reefbrug (TE secties E, F & G)*

De maximaal toelaatbare spanning is analytisch bepaald. Het schema dat gebruikt is voor de bepaling van de maximale drukspanning is weergegeven in Figuur 5-9. Aan de hand van [N19] 6.5.4.2 is de kritieke knikspanning bepaald als $\sigma_{cr,c}$ = 13,7 MPa. Hierbij is voor de sterkte van het blad het volledige sandwichpaneel in rekening gebracht, de hoogte van dit deel (b) is ~510 mm. De gemiddelde optredende spanning is ~12 MPa (donkergroene waarde in bovenstaande figuur). Het bepalen van de kritieke drukspanning is zeer gevoelig voor de geometrie van het drukvlak (hoogte paneel en dikte). In het DO dienen deze dimensies nauwkeuriger bepaald te worden.

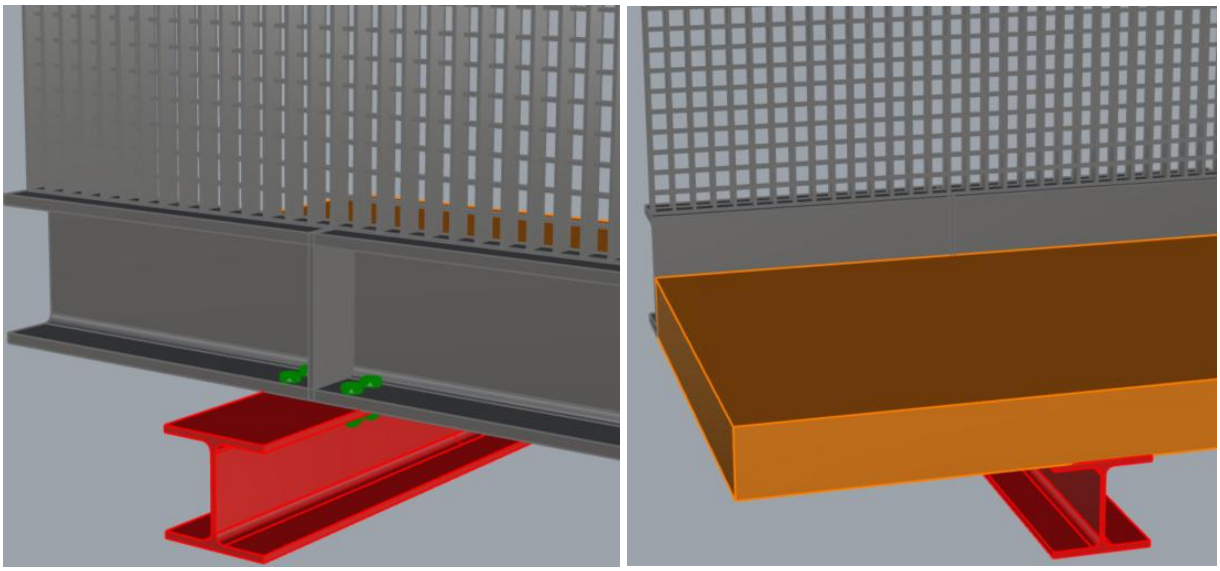



*Figuur 5-9: Oplegschema bepaling knikspanning staart blad Reedbrug (1 zijde scharnierend, 1 zijde ingeklemd)*

Bovenstaande berekening bevestigt de gevoeligheid van de tip op drukspanning en toont aan dat de ingeschatte capaciteit op plooi slechts iets hoger is dan de optredende spanning. Het uitwerken van de drukzone blijft een belangrijk aandachtspunt voor het DO. Indien uit nadere analyse de geringe marge blijft, moet dit deel versterkt worden of moet het ontwerp ondersteund worden met proeven.

### 5.7.1 Dek, leuning, randbalk en dwarsdragers

Voor het deksysteem van de hoofdoverspanning is gekozen voor een VVK-sandwichpaneel op dwarsdragers. De voor het VO geselecteerde elementen zijn weergegeven in Figuur 5-10. Voor een h.o.h. afstand van 2.0 meter is als dwarsdrager minimaal een HEA 140 benodigd. Het VVK-sandwichpaneel is voor de hoofdoverspanning tenminste 80 mm dik en voor de aanbruggen tenminste 100mm dik nodig. Voor de randbalk is een PFC 200x90x30 weergegeven. Tot slot is de leuning aangehouden als een rooster van 900 mm hoog, spijlen van 40x3 mm en een maasgrootte van 50x50mm.



*Figuur 5-10: Schetsen dekconstructie (100mm sandwichpaneel), randbalk (PFC 200x90), leuning (40x3 met maasgrootte 50x50mm) en dwarsbalk (HEA14) voor VO Reefbrug*

Het deksysteem voor de aanbruggen is in opbouw van elementen en dekopbouw gelijk. Voor de randbalk dient halverwege de overspanning een steun aan dit dek gemaakt te worden, om zo een

torsiestijve ondersteuning van de randbalk te realiseren. Deze bevestiging wordt in het DO nader uitgewerkt te worden.

### 5.7.2 Dekken

Voor een VVK-sandwichpaneel is de samenstelling van het dek project specifiek vast te stellen. De hoogte, materiaalopbouw en diktes van deze materialen zijn in DO voor een economisch- en duurzaam efficiënter ontwerp te optimaliseren.

Het dek voor de aanbruggen overspant 4 m. Het bestaat uit huiden van 10 mm, lijfdiktes van 5 mm, met een h.o.h. afstand van 200 mm, zie Bijlage Vb. Alle laminaten zijn uitgevoerd in glasvezelversterkte polyester laminaten. De kern van het dek bestaat uit 80 mm schuim. Voor het dek is een puntlast van 7kN op de verticale lijven maatgevend, met lokale stabiliteit als faalmechanisme. Hiervoor wordt 76% van de sterkte van het lijf geütiliseerd.

Voor de hoofdoverspanning voldoet een dek van 80 mm dik, met huiden van 8 mm. De berekening van beiden dekken zijn bijgevoegd in Bijlage Va en Vb. Voor eenvoudigere produceerbaarheid en materiaaloptimalisaties mogelijk te maken wordt voor beide dekken een hoogte van 100 mm gereserveerd.

### 5.7.3 Leuning en randbalk

De randbalk is uitgevoerd als PFC 200x90x30. ‘Vanwege inspecteerbaarheid van de bevestigingen aan de dwarsbalken is gekozen voor een open profiel met verticale schotten. De volledige toetsing van de leuning en randbalk is meegeleverd in Bijlage IV.

De sterkte van deze randbalk is niet maatgevend. Er is voor een afwijkend profiel (niet UNP of UPE) gekozen voor de verbinding met de dwarsbalk. Hierbij moet er ruimte zijn in onderflens voor 2x2 M14 bouten, wat niet mogelijk was bij een standaard UNP of UPE. De horizontale uitwijking, in samenstelling met de leuning, is behandeld in hoofdstuk 5.5.2. Ook voor de leuning geldt dat de horizontale verplaatsing meer maatgevend is dan de sterkte.

De boutverbinding is belast op dwarskracht en moment, wat resulteert in trekkracht in de bouten. De boutverbinding is het zwakst op de normaalkrachten in de bouten. Met de afstand tussen de bouten als arm tegen het moment worden de bouten voor 58% van sterkte geütiliseerd. Hierbij wordt wel de laagste weerstand bepaald door een deels plastisch faalmechanisme. De volledige toetsing van de leuning en randbalk is meegeleverd in Bijlage IV.

### 5.7.4 Dwarsdragers

Voor het VO zijn alle relevante toetsen uitgevoerd. Voor de dwarsbalken is uitgegaan van HEA140 profielen van staal S355. De toetsing van de dwarsdragers is meegeleverd in Bijlage VI. De dwarsdragers zijn maatgevend belast door de gelijkmatig verdeelde belasting. Hierbij is de

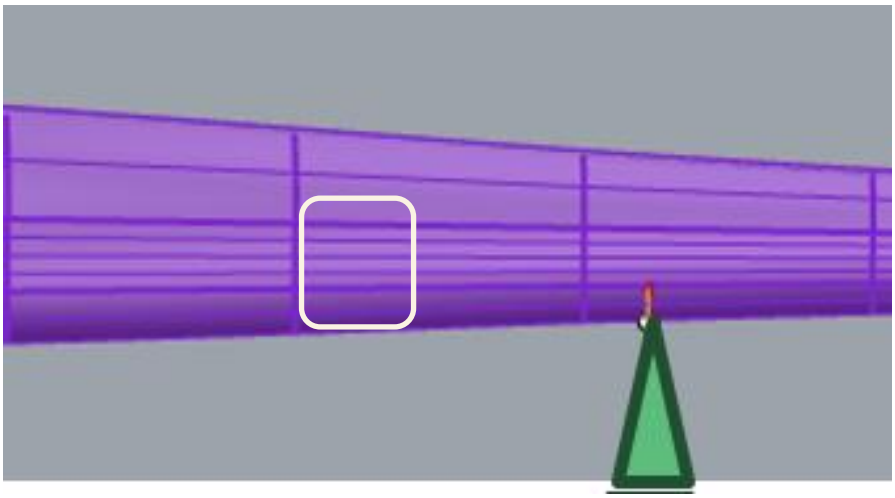
buigspanning in het midden van de overspanning maatgevend. Voor deze buigspanning wordt de dwarsdrager voor 62% geütiliseerd. De toetsing van de dwarsdragers is meegeleverd in Bijlage VI.

## 5.8 Verbinding dwarsdrager met windturbineligger

In het VO zijn de verbindingen van de dwarsbalken aan de windturbineligger en de verbinding van de leuningvoet aan de dwarsbalken uitgewerkt. De overige verbindingen zijn minder kritisch en worden uitgewerkt in het DO. Deze paragraaf gaat enkel in op de verbinding van de dwarsbalk aan de windturbineligger. De verbinding van de leuningvoet aan de dwarsbalken is beschreven in de paragraaf 5.7.3.

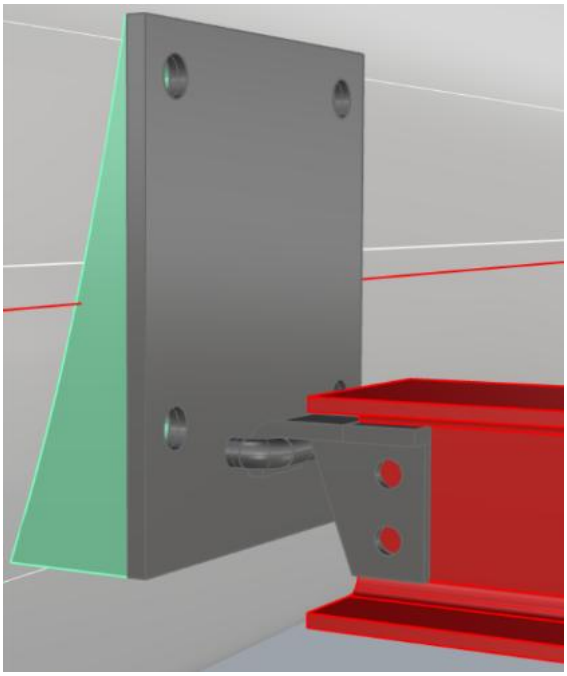
De verbinding bestaat in concept uit een verbindingsplaat die gebout wordt aan de windturbineligger, met 4 M24 bouten. De dwarsbalk is via een haaksysteem scharnierend bevestigd aan de windturbineligger, om het moment en de daarmee samenhangende trekkrachten te minimaliseren.

De verbinding van de dwarsdrager aan de windturbineligger voor het VO is uitgewerkt voor het kritieke deel van het blad. Met een hart-op-hart afstand voor de dwarsdragers van 2,0 m, zal de eerste verbinding aan de tipzijde vallen in deel G. De locatie van de eerste verbinding is weergegeven in Figuur 5-11. De volledige berekening van de verbinding van de dwarsdrager aan de windturbineligger is meegeleverd in Bijlage VII.



*Figuur 5-11: Locatie eerste verbinding dwarsdrager Reefbrug (witte arcering)*

Door de aerodynamische vorm van het windturbineblad ontstaat een ruimte tussen de ligger en de plaat die opgevuld moet worden, met van tevoren ontworpen vulstukken, zie Figuur 5-12. Aan de plaat is vervolgens een oog gemonteerd waarin de ligger gehaakt kan worden. De haak is doormiddel van verbindingsplaten gebout in het lijf van de dwarsdrager, met 2 M16 bouten. Het principe-ontwerp van de verbinding is weergegeven in Figuur 5-12.



*Figuur 5-12: Ontwerp verbinding dwarsdrager-blad VO Reefbrug*

De verbinding is analytisch getoetst aan de hand van de verwachte belasting. De dwarskracht op een verbinding is maximaal 23 kN. Uitgaande van 4 bouten wordt voor een verbinding enkel op dwarskracht 74% van de sterkte van het blad geütiliseerd. Conform [N19] 8.3.8 moet de uitnuttingsgraad voor dwarskracht en trekkracht opgeteld lager dan 1,0 zijn. De verwachte optredende trekkracht is 4,6 kN. De benodigde trekcapaciteit van de verbinding is dan 1/0,26* 4,6kN = 17,7 kN. Met rampamoeren M24x30mm is de verwachte uittrekcapaciteit per bout 9,5kN.

Dit houdt in dat voor het behalen van een h.o.h. afstand van 2,0m, een bevestiging met 4 rampamoeren niet voldoet. Dit houdt in het DO proces meer bouten of bouten met een hogere uittrekcapaciteit toegepast moeten worden.

Er zijn blindverbindingen met een hogere capaciteit beschikbaar. Deze capaciteit zal met componentproeven bepaald moeten worden in de DO-fase. Indien nodig kan de bevestiging met meer dan 4 bouten uitgevoerd worden – of zal de constructie alsnog lokaal versterkt worden. Alternatieven voor het opnemen van de trekkracht zouden varianten op een blinde moer of een met de hand geplaatste contraplaat kunnen zijn. Daarnaast dient het volledige ontwerp geverifieerd te worden aan de hand van testen.

## 5.9 Reactiekrachten

Als input voor het geotechnisch ontwerp zijn de reactiekrachten bepaald. De reactiekrachten zijn analytisch bepaald met de verwachte waardes van het eigengewicht en de belastingen. Voor de reactiekrachten is de windbelasting wel meegenomen, omdat het voor de horizontale reactiekrachten maatgevend is. Het eigen gewicht is verdeeld aan de hand van de reactiekrachten uit de E.E.A.

De waardes zijn weergegeven in Tabel 5-7. In deze tabel staat de samenvatting van de reactiekrachten bij bepaalde belasting combinaties in de lastrichting. De berekening waarop deze samenvatting is gebaseerd is opgenomen in Bijlage VIII.

*Tabel 5-7: Reactiekrachten Reefbrug, waardes in kN, dikgedrukt maatgevende waarde in die lastrichting*

| Combinatie | Last | Totaal | SP Wortel | SP Tip | LH Wortel | LH Tip |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6.10 a E.G. overheersend | Verticale belasting | 339,2 | 160,4 | 134,1 | 22,7 | 22,1 |
| | Horizontaal; dwars-belasting | 98,2 | 49,3 | 48,9 | 0,0 | 0,0 |
| | Horizontaal; langs-belasting | 10,9 | 5,0 | 5,0 | 0,4 | 0,4 |
| 6.10 b g.v.b. overheersend | Verticale belasting | 504,8 | 226,7 | 202,1 | 38,5 | 37,5 |
| | Horizontaal; dwars-belasting | 98,2 | 49,3 | 48,9 | 0,0 | 0,0 |
| | Horizontaal; langs-belasting | 27,3 | 12,6 | 12,5 | 1,1 | 1,1 |
| 6.10 b wind overheersend | Verticale belasting | 321,1 | 151,2 | 127,1 | 21,7 | 21,2 |
| | Horizontaal; dwars-belasting | 122,7 | 61,6 | 61,1 | 0,0 | 0,0 |
| | Horizontaal; langs-belasting | 10,9 | 5,0 | 5,0 | 0,4 | 0,4 |

*(E.G. = Eigen Gewicht, g.v.b. = gelijkmatig verdeelde belasting, SP = Steunpunt, LH = Landhoofd)*

# 6 Vergelijking aangehouden materiaaleigenschappen VO met testresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de coupon testen vergeleken met de in de VO-berekening aangehouden materiaaleigenschappen op basis van de burn-off testen. De coupontesten zijn beschreven in [R7], de burn-off testen in [R6]. Het verwerken van de burn-off testen is beschreven in paragraaf 3.3.2. Doordat het resultaat van de coupon testen richting het einde van het VO beschikbaar werden en slechts voor twee zones beschikbaar zijn, is ervoor gekozen dit resultaat nog niet direct te verwerken in het VO. Een eerste beoordeling wordt kwalitatief gedaan voor de 2 zones, zijnde de Leading Panel en Trailing Panel.

## 6.1 Doel

In deze VO-rapportage wordt het eerste deel van de testresultaten vergeleken met de aangehouden materiaaleigenschappen om te verifiëren in welke mate de VO-berekeningen conservatief zijn.

De uiteindelijke doelen van het verwerken van de testmaterialen voor het VO van de Reefbrug zijn:

- Vergelijking aangehouden materiaaleigenschappen VO met testresultaten
- Hoe kunnen de testresultaten verwerkt worden dusdanig dat ze inzicht geven in de materiaaleigenschappen van de turbineligger van de Reefbrug?
- Wat is het gevolg van de testresultaten op het VO van de Reefbrug?
- Welke stappen moeten voor volgende projecten herhaald worden om het ontwerpproces te kunnen versnellen terwijl de betrouwbaarheid behouden blijft?

Dit wordt in de DO-fase verder uitgewerkt.

### 6.1.1 Proefstukken en testbatches

Als proefstukken zijn op 2 bladdelen testen uitgevoerd, namelijk de **L**eading **P**anel, en **T**railing **P**anel. Op deze delen zijn zowel trek als druk testen uitgevoerd in de lokale hoofd vezelrichting. De teststukken zijn geproduceerd door ze uit de desbetreffende panelen te snijden. Vervolgens zijn ze verdeeld in hoofdzakelijk UD-teststukken en teststukken met de CSM en Bidirectionele matten, welke bij elkaar gegroepeerd zijn en Multi genoemd. Het groeperen is gedaan door de uitgezaagde teststukken ook in dikterichting doormidden te zagen, daar waar en overgang van voornamelijk UD-matten met multi-matten bevindt. Alle teststukken komen uit bladdeel E.

Het verdelen van de matten in UD en Multi teststukken is ook een bron van onzekerheid in de teststukken. In de testdata is zichtbaar dat de UD-lamellen hoogstwaarschijnlijk delen Multi bevatten, door een progressief faalgedrag. Doordat Multi elke samenstelling van CSM en BI matten kan hebben, zit er potentieel meer variatie in de materiaaleigenschappen.

In totaal zijn er ongeveer 75 coupontesten uitgevoerd, waarvan 43 bruikbare data hebben opgeleverd. Deze batchgrootte is weergegeven in
Tabel 6-1.

*Tabel 6-1: Batchgrootte coupontesten E-LP en E-TP VO Reefbrug.*

| | Trek-UD | Trek-Multi | Druk-UD | Druk-Multi |
|---|---|---|---|---|
| **L**eading **P**anel | 5 | - | 5 | 5 * |
| **T**railing **P**anel | 5 | 11 | 6 | 6 |

** Door testomstandigheden is voor deze batch enkel de stijfheid gedocumenteerd [R7].*

### 6.1.2 Invloed afwijkingen in vezel oriëntatie.

Naast de materiaaleigenschappen zijn ook de hoek van de vezels t.o.v. het teststuk waargenomen. Dit is enkel gedaan voor de UD-teststukken, voor de Multi-teststukken is het effect van zo'n hoek zeer gering. Van de UD-teststukken zijn de gemeten hoeken allemaal onder de 5°, conform [N19] acceptabel. Met de klassieke laminatentheorie is verkend wat het effect van deze hoek weergegeven in Tabel 6-2.. Alle effecten zijn < 1 %, en dus te verwaarlozen.

*Tabel 6-2: Effect van hoek vezels t.o.v. teststuk voor UD teststukken VO Reefbrug*

| | Trek | Druk |
|---|---|---|
| $E_x$ | 0,57 % | 0,36 % |
| $\sigma_x$ | 0,33% | 0,2 % |
| $\varepsilon_x$ | 0,31 % | 0,25% |

## 6.2 Methode

De methode om karakteristieke waardes te bepalen is overgenomen uit de norm. De norm geeft 2 methodes om de rekenwaardes te bepalen, de zijn:

- CUR 96 B.6 (karakteristieke waardes uit testen, daarna toepassen conversiefactoren).
  - In NEN-EN 1990:2025 art. D.5 is de voorkeur voor deze methode uitgesproken.
  - Voor VO-fase is voor deze aanpak gekozen.
- CUR 96 B.7 (direct bepalen rekenwaardes).

Binnen de norm en statistische methodes zijn er meerdere statistische verdelingen mogelijk om de rekenwaardes op te baseren. Deze zijn:

- Normaal
  - Simpelere uitwerking.
- Log-normaal

- Als voordeel dat er geen negatieve resultaten kunnen zijn.
- EN 1990 bijlage D spreekt voorkeur uit voor Log-normaal. Veel materialen zouden deze verdeling volgen (niet te verifiëren met geringe sample grote).

Tot slot zijn er verschillende manieren om de testresultaten te beschouwen, deze zijn:

- Testresultaten voor LP- en TP-samples apart beschouwen.
  - Resultaat is dus beschouwen als 2 verschillende materialen; keuzes maken waar welk materiaal wordt toegepast.
- Testresultaten voor LP- en TP-samples samen beschouwen (poolen)
  - Lastig te combineren bij grote verschillen in materiaaleigenschappen, zoals bij Multi
  - Beter mogelijk bij duidelijker te definiëren samenstelling, zoals bij UD.

Doordat er vooraf niet duidelijk is wat het gevolg is van welke statistische verdeling en wel/niet poolen van de testresultaten, zijn deze 4 situaties uitgewerkt in de volgende paragraaf. Alle gebruikte formules zijn ontleend aan [N0] D.7.2, de volledige uitwerking van de testresultaten is weergegeven in Bijlage IX.

## 6.3 Resultaat

### 6.3.1 Materiaaleigenschappen, algemeen

Voor een eerste uitwerking zijn de verschillen in stijfheden en sterkte tussen lognormaal en normaal, en gecombineerd en los op een rijtje gezet, Tabel 6-3. Met behulp van de DIC-gegevens werd de rek bij falen geregistreerd. Dit wordt weergegeven als waargenomen rek. Om lineaire elastische berekeningen op basis van rekcriteria mogelijk te maken, wordt voor elke test de lineaire rek bij falen berekend door de sterkte (σ11) te delen door de stijfheid (E11) die uit de DIC-gegevens is verkregen. Dat is de lineaire rekgrens.

*Tabel 6-3: Resultaten verwerken testgegevens VO Reefbrug*

| **Young's module $E_{11}$ [GPa]** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Normaal onderdeel** | Trek | | Druk | | **Lognormaal onderdeel** | Trek | | Druk | |
| | UD | Multi | UD | Multi | | UD | Multi | UD | Multi |
| LP | 26.9 | - | 29.7 | 10.4 | LP | 26.9 | 0.0 | 29.7 | 10.4 |
| TP | 31.1 | 13.1 | 25.6 | 10.5 | TP | 31.1 | 13.1 | 25.6 | 10.5 |
| Gecombineerd | 29.0 | 13.1 | 27.5 | 10.4 | Gecombineerd | 29.0 | 13.1 | 27.5 | 10.4 |
| **Bezwijkspanning $\sigma_{11}$ [MPa]** | | | | | | | | | |
| **Normaal onderdeel** | Trek | | Druk | | **Lognormaal onderdeel** | Trek | | Druk | |
| | UD | Multi | UD | Multi | | UD | Multi | UD | Multi |
| LP | 383.0 | - | 336.4 | - | LP | 387.3 | - | 340.2 | - |
| TP | 384.8 | 149.7 | 322.0 | 105.1 | TP | 387.2 | 150.1 | 323.8 | 114.6 |
| Gecombineerd | 387.5 | 149.7 | 323.0 | 105.1 | Gecombineerd | 390.2 | 150.1 | 326.1 | 114.6 |

| Lineaire rekgrens $\varepsilon_{11}$ [-] | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Normaal onderdeel** | Trek | | Druk | | **Lognormaal onderdeel** | Trek | | Druk | |
| | UD | Multi | UD | Multi | | UD | Multi | UD | Multi |
| LP | 1.39% | - | 0.98% | - | LP | 1.41% | - | 1.05% | - |
| TP | 1.11% | 1.02% | 1.18% | 1.31% | TP | 1.13% | 1.03% | 1.20% | 1.32% |
| Gecombineerd | 1.14% | 1.02% | 1.10% | 1.31% | Gecombineerd | 1.18% | 1.03% | 1.13% | 1.32% |
| **Waargenomen rekgrens bij falen coupon $\varepsilon r_{11}$ [-]** | | | | | | | | | |
| **Normaal onderdeel** | Trek | | Druk | | **Lognormaal onderdeel** | Trek | | Druk | |
| | UD | Multi | UD | Multi | | UD | Multi | UD | Multi |
| LP | - | - | -3.69% | - | LP | - | - | 0.38% | - |
| TP | - | - | 1.21% | 1.28% | TP | - | - | 1.22% | 1.35% |
| Gecombineerd | - | - | -2.16% | 1.28% | Gecombineerd | - | - | 0.36% | 1.35% |

In bovenstaande tabel zijn de resultaten voor de trek- en druktesten, los en gecombineerd beschouwd. Het geringe aantal samples heeft als resultaat dat de resulterende waarde van de eigenschappen niet sterk afhankelijk zijn van de gekozen statistische verdeling.

In de tabel is te zien dat er grote variatie is in multi-teststuk eigenschappen, voor de verschillende delen van het blad. Dit is waarschijnlijk te verklaren doordat de opbouw tussen bladdelen en teststukken licht varieert (verschillend aandeel bi-directioneel en CSM). Dit terwijl de UD-teststuk eigenschappen tussen bladdelen relatief eenduidig zijn.

Daarnaast zijn de rekgrenzen relatief laag, als deze vergeleken worden met de rekgrenzen voor een nieuw VVK-materiaal. Dit wordt behandeld in de volgende paragraaf. Tot slot is er bij de UD-teststukken een verschil geconstateerd in stijfheid tussen de trek- en druktoetsen. Dat deze drukstijfheid voor de Trailing Panel wat lager uitvalt is nadelig voor de plooi in het midden van de overspanning. Bij de verdere materiaaltesten is dit een aandachtspunt.

### 6.3.2 Verschillen in lineaire rekgrens.

Opvallend in de resultaten is het verschil in lineaire rekgrens. De uit de proeven afgeleide lineaire rekgrenzen zijn vergeleken met de richtwaarden voor nieuw VVK-materiaal conform de CUR96, zie
Tabel 6-4. Voornamelijk de waardes voor UD-lamellen op trek wijken af van wat in de CUR96 wordt aangegeven als verwachte richtwaarde. Enige veroudering in het materiaal is te verwachten (orde 10-20%). Voor het UD-materiaal op trek is de afwijking significant groter (43%). Mogelijke oorzaak kan liggen in het feit dat de materiaaltesten niet uitgevoerd zijn op perfect samengestelde vlakke coupons, maar op stroken uit een daadwerkelijke constructie.

De invloed hiervan is gering, omdat in het ontwerp gerekend wordt met een vereenvoudigde rekgrens van 1,2% voor alle axiale rekken.

*Tabel 6-4: Vergelijking testresultaten voor lineaire rekgrens met karakteristieke richtwaarden CUR96 voor VO Reefbrug.*

| | UD | | | Multi | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Testen | Norm (richtwaarde) | Verschil | Testen | Norm | Verschil |
| $\varepsilon_{11,\ trek}$ | 1,14% | 2,0% | - 43 % | 1,02% | 1,4% | - 27% |
| $\varepsilon_{11,\ druk}$ | 1.1% | 1,2% | - 8 % | 1,31% | 1,2% | + 9 % |

## 6.4 Vergelijking testwaarden met aangehouden waarden in het VO

De stijfheid en sterkte van de lamellen zoals aangehouden in het VO zijn vergeleken met de waarden die uit de testen zijn afgeleid. Deze vergelijking is weergegeven in Tabel 6-5.
De weergegeven aangehouden stijfheden van de Multi-proefstukken zijn verkregen door in eLamX de laminaateigenschappen zonder UD-lamellen te berekenen. De sterkte-waarden zijn bepaald als σ = 1,2% * E, voor zowel UD als Multi.
Verschillen van 5% - 10% zijn als een beperkte afwijking te beschouwen. Deze zijn geel gemarkeerd. Grotere verschillen zijn gevonden voor de druktesten en met name de Multi-proefstukken, afwijkingen boven de 10% zijn oranje gemarkeerd en boven de 20% met rood. Opgemerkt wordt dat zowel de drukproef als het multi-laminaat gevoelig zijn voor variaties.

Voor de TP-Multi-druksterkte is een overschatting van 20% in het VO aanwezig. Dit komt met name door de grote variatie (Vx = 23%) die uit de testen blijkt. Dat is erg hoog en zorgt voor een grote afwaardering van de gemiddelde waarde om tot een karakteristieke waarde te komen. In het testrapport wordt als verklaring gesteld:

> *Net als bij de trekcoupons is het waarschijnlijk dat de grootte in spreiding van de resultaten gerelateerd is aan meer dan alleen variaties in materiaaleigenschappen. De spreiding in sterktewaarden voor de multidirectionele coupons die in compressie worden getest, is zelfs groter dan die van de trekproeven, wat verklaard kan worden door de asymmetrie in de coupon samenstelling. Ook zijn monsters bij compressie in plaats van trektest nog kwetsbaarder voor imperfecties door coupon voorbereiding.*

De variatie in eigenschappen en drukwaarden zijn een aandachtspunt voor de verdere proeven.

*Tabel 6-5: Stijfheid en sterkte vergelijking lameleigenschappen tussen coupontest resultaten en aangehouden waardes VO Reefbrug*

| Mat | E11 trek [GPa] | | | E11 druk [GPa] | | | σ11 trek [MPa] | | | σ11 druk [MPa] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Coup. testen | VO | Δ | Coup. testen | VO | Δ | Coup. testen | VO | Δ | Coup. testen | VO | Δ |
| LP-UD | 26.9 | 28.3 | -5.0% | 29.7 | 28.3 | 4.9% | 387.3 | 339.4 | 14.1% | 340.2 | 339.4 | 0.2% |
| TP-UD | 31.1 | 28.3 | 10.1% | 25.6 | 28.3 | -9.4% | 387.2 | 339.4 | 14.1% | 323.8 | 339.4 | -4.6% |
| LP-Multi | - | 11.82 | - | 10.4 | 11.82 | -12.4% | - | 141.9 | - | - | - | - |
| TP-Multi | 13.1 | 11.99 | 9.5% | 10.5 | 11.99 | -12.8% | 150.1 | 143.9 | 4.3% | 114.6 | 143.9 | -20.4% |

Vervolgens is bekeken in welke mate de laminaten in de constructie UD of Multi gedomineerd zijn. Deze vergelijking is weergegeven in Tabel 6-6. Opgemerkt wordt dat voor beide laminaten, en met name in het Leading Panel het aandeel UD groter is dan het aandeel Multi. De verschillen in de eigenschappen zijn voor het UD- geringer dan voor de multi-laminaten. Dit is gunstig voor de mate waarin de geconstateerde verschillen invloed hebben op het de constructie en het ontwerp.

*Tabel 6-6: Samenstelling laminaten TP en LP  VO Reefbrug*

| Lamelverdeling | | |
|---|---|---|
| | UD | Multi |
| LP | 85% | 15% |
| TP | 57% | 43% |

## 6.5 Conclusie coupontesten

Aan de hand van de resultaten zijn de volgende conclusies getrokken:

- Er is verschil in samenstelling van de Multi laminaten per paneel:
  - Er is verschil in stijfheid tussen Multi LP en TP. Dit is ook terug te halen uit burn-off tests. TP heeft lager aandeel CSM en dus een iets lagere stijfheid. Echter is het verschil in CSM gering (~10 %) en is het verschil in stijfheid aanzienlijk. Een ander potentiële oorzaak is dat er meerdere soorten CSM zijn toegepast. Dit is wel waargenomen maar niet gedocumenteerd voor elk paneel [R6].
  - Er zijn nog geen geldige sterkte-resultaten van de LP-proefstukken.
- Verschil in verwachte en geteste lineaire rekwaardes voor UD-lamellen.
  - Ouder materiaal uit een vconstructie wordt hierbij vergeleken met richtwaarden voor nieuw materiaal, afgeleid uit strak geproduceerde coupons. Enige veroudering in het materiaal is te verwachten (orde 10-20%). Voor het UD-materiaal op trek is de afwijking significant groter (43%). Mogelijke oorzaak kan liggen in het feit dat de materiaaltesten niet uitgevoerd zijn op perfect samengestelde vlakke coupons, maar op stroken uit een daadwerkelijke constructie.

- Door de versimpelde rekcriteria en aanhouden van een lage toegestane maximale rek is de gemeten rekgrens vergelijkbaar met de aangehouden rekgrens. Het verschil tussen de gemeten rekgrenzen en de theoretisch waarde (1,14%-1,1% t.o.v. 1,2%) heeft voor het VO geen groot direct gevolg. Voor de volgende fases van het project en de verdere materiaaltesten is het van belang om te zien of deze lagere waarden ook in andere zones gevonden wordt, zoals de sparcap.

- Stijfheid verschil tussen druk- en trekwaarden UD-lamellen.
  - Voornamelijk in het Trailing Panel is een verschil in stijfheid waargenomen tussen druk en trek. (orde 17%). Voor UD-materiaal is de verwachting dat deze waarden relatief gelijk zouden moeten zijn. Dit zou verklaard kunnen worden beïnvloeding van de teststukken door aanwezigheid van Multi matten in de stukken, door gevoeligheid van de drukproeven voor imperfecties, maar zou mogelijk ook op vermoeiing kunnen duiden. Bij de LP UD-proefstukken is de bepaalde drukstijfheid juist weer iets hoger dan de trekstijfheid.
  - Bij de verdere materiaalonderzoeken moet bekeken moet worden of dit verschil ook geconstateerd wordt in andere zones. Het DO-ontwerp wordt gebaseerd op de geteste materiaaleigenschappen en met de geconstateerde verschillen wordt in de verdere uitwerking rekening gehouden.
  - Daarnaast is het iets lager uitvallen van de drukstijfheid in deze zone een aandachtspunt voor de plooisterkte van deze zone in het DO.
- Doordat dit enkel testen zijn in de hoofdrichting van het laminaat voor de LP- en TP-zone, is het exacte effect voor het VO niet vast te stellen. Aan de hand van de bekende data wordt ingeschat:
  - Stijfheid voor de Multi-teststukken is op druk iets lager dan aangenomen. Voor het Trailing panel is de drukstijfheid ook lager. Alle andere gemeten stijfheden vallen juist hoger uit dan aangenomen.
  - Als gevolg hiervan kan de vervorming iets hoger uitvallen en de eigenfrequentie lager uitvallen. De aangehouden marges in het ontwerp zijn groter dan de geconstateerde verschillen. Naar verwachting is dit niet van invloed op het ontwerp.
  - De rekgrens van 1,2% wordt, over het algemeen, niet gehaald door de UD- en Multi-teststukken. Dit heeft tot gevolg dat de toelaatbare spanningen voor het blad wellicht iets lager zullen uitvallen dan waar in het VO mee rekening is gehouden. Voor de globale sterkte is er voldoende marge en zal het gevolg mee vallen. Voor de detailberekeningen is dit een aandachtspunt.

# 7 Conclusie

Voor de vervanging van de Reefbrug is een Voorlopig Ontwerp uitgewerkt waarbij twee gebruikte windturbinebladen (type NM52/900) als hoofddraagconstructie dienen, met een hoofdoverspanning van 14 m tussen twee rotatievrije opleggingen en aanbruggen aan weerszijden die niet op de bladen afdragen. Deze configuratie is gekozen na een variantenstudie waarin bleek dat een grotere overspanning (18 m) een inklemming aan de wortelzijde zou vereisen om plooiproblemen te voorkomen. Door een tussensteunpunt toe te passen en de overspanning te verkleinen tot 14 m kan voor rotatievrije opleggingen worden gekozen.

De belangrijkste conclusies per onderdeel:

- **Sterkte en stijfheid globaal:** Alle getoetste doorsnededelen blijven ruim binnen de toelaatbare spanningen (hoogste u.c. = 0,72 bij de Spar Cap op $\sigma_y$). De globale doorbuiging (u.c. = 0,13) en de eigenfrequenties (buiten de kritieke bandbreedte voor voetgangersbruggen) voldoen eveneens met marge.
- **Details:**
  - *Oplegging*: het blad wordt op twee punten eenvoudig ondersteund via een zadelconstructie aan de onderzijde, waarvoor de bestaande landhoofden aangepast en de tussensteunpunten verwijderd moeten worden. Beide opleggingen zijn rotatievrij uitgevoerd; door de overspanning te verkleinen van 18 m naar 14 m kan een inklemming worden vermeden.
  - *Dek*: er is gekozen is voor een VVK-sandwichpaneel op stalen dwarsdragers. Hierbij is het dek 100 mm dik (voor zowel hoofdoverspanning als aanbruggen) en is de h.o.h. afstand van de dwarsdragers (HEA 140) gesteld op 2,0 m. De dwarsdrager-utilisatie is 62% en de dek-utilisatie is 76%.
  - *Leuning*: de leuning bedraagt een rooster van c.a. 1 m hoog, met staven van 40x3 mm en maasgrootte van 50x50 mm. De leuning is gelast aan een randbalk van PFC 200x90x30 profiel, welke gebout is aan de dwarsbalken. Deze constructie kan een overspanning van 2 m overbruggen.
  - *Verbindingen (dwarsdrager – blad)*: Van de onderzochte boutverbinding en buisverbinding is gekozen voor de boutverbinding, vanwege een grotere kennisbasis en een voorkeur van de architect. Bij een h.o.h. afstand van 2,0 m tussen de dwarsdragers wordt de dwarskrachtcapaciteit van het blad voor 74% benut; voor de bijkomende trekkracht op de boutverbinding is een hogere capaciteit van het bevestigingsmiddel nodig of een interne versterking nodig, wat een uitwerkpunt is voor het DO.

- **Materiaaleigenschappen blad:** Aan de hand van burn-off tests en dikte metingen zijn de laminaateigenschappen per doorsnededeel (Leading Edge, Leading Panel, Spar Cap, Shear Web, Trailing Panel, Trailing Edge) bepaald. Deze laminaateigenschappen zijn gebruikt voor het uitwerken van het VO. Vergelijking van de eerste resultaten voor de LP- en TP panelen met de aangenomen waardes (Hoofdstuk 6) laat zien dat er verschillen zijn in stijfheid en sterkte. Het DO-ontwerp wordt gebaseerd op de geteste materiaaleigenschappen en met de geconstateerde verschillen wordt in de verdere uitwerking rekening gehouden.
- **Aandachtspunten voor het DO:**
    - *Plooi in de drukzone*: de drukzone tussen het midden- en de tipzone van het blad is gevoelig voor plooi; de kritieke knikspanning (13,7 MPa) ligt dicht bij de opgetreden spanning (~12 MPa), dit is een belangrijk punt van uitwerking. Daarnaast is bij het verwerken van de coupontesten een iets lage drukstijfheid (orde 17%) van het UD-materiaal in dit deel van het blad geconstateerd. De uitwerking gebeurd op basis van de eigenschappen uit de materiaaltesten.
    - *Verbindingen dwarsdrager-blad*: bij een h.o.h. afstand van 2,0 m is een effectieve oplossing nodig om de combinatie van dwarskracht en trekkracht op te vangen. Dit wordt in het DO verder onderzocht. De verbinding dient ondersteund te worden door componenttesten.
    - *Verbinding leuning – dwarsdrager*: bij een h.o.h. afstand van 2,0 m is de verbinding van de leuning aan de dwarsdrager voldoende sterk op de resulterende krachten. Het maatgevende faalmechanisme is echter deels plastisch, wat een aandachtspunt is voor het DO.
    - *Vermoeiing*: de geteste lineaire rekgrens van UD-lamellen op trek ligt significant (-43%) lager dan de richtwaarde van de norm voor nieuw materiaal. Een reductie van 10 – 20% is te verwachten. Dit is een aandachtspunt bij de verdere materiaaltesten. Mogelijke oorzaak kan liggen in het feit dat de materiaaltesten niet uitgevoerd zijn op perfect samengestelde vlakke coupons, maar op stroken uit een daadwerkelijke constructie. Bekeken moet worden of deze trend ook waargenomen wordt in bijvoorbeeld de spar cap. Voor het VO heeft dit door de gehanteerde conservatieve rekcriteria geen grote consequenties, maar dit vraagt in het DO nadere aandacht.
    - Wellicht is het monitoren van stijfheid van de liggers (eigenfrequentietest, of zakkingsproef) kan gebruikt worden om veranderingen van eigenschappen te monitoren over de levensduur.

Samenvattend biedt het VO een technisch haalbaar ontwerp met voldoende marge op de globale toetsingen, waarbij plooigevoeligheid van de bladstaart, de detaillering van de verbindingen en de invloed van vermoeiing op de materiaaleigenschappen de belangrijkste openstaande aandachtspunten voor het Definitief Ontwerp vormen.

# Bijlage I

## Bepaling doorsnede eigenschappen voor 1D toets

Analytische bepaling voor de doorsnede eigenschappen van bladdeel F voor de 1D toets van de VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Bijlage II

## Rapportage SoFiSTiK

Berekeningen en resultaten E.E.A. in SoFiSTiK, model gebaseerd op 3d scan.

Haskoning
Enhancing Society Together

## Bijlage III

# VO Toetsing kritieke drukspanning

Bepaling voor kritieke drukspanning in midden van de overspanning, VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

## Bijlage IV

# VO Toetsing leuning en randbalk

Bepaling voor randbalk en leuning VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Bijlage V

## VO Toetsing dekken

Bepaling VVK-sandwich dekken voor 2m overspanning (80mm dik) en 4m overspanning (100mm dik) VO Reefbrug

# Bijlage VI

## VO Toetsing dwarsdragers

Bepaling voor dwarsdragers voor VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

## Bijlage VII

# VO Toetsing verbinding dwarsdrager met turbineligger

Bepalingen verbinding dwarsdrager met turbineligger, kritieke doorsnede, VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Bijlage VIII

## Reactiekrachten

Bepaling reactiekrachten op landhoofd en steunpunten
Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Bijlage IX

## Bepaling  karakteristieke waarden uit de testen

Verwerken van ruwe testdata naar rekenwaarden.

Haskoning
Enhancing Society Together

# Bijlage I

## Bepaling doorsnede eigenschappen voor 1D toets

Analytische bepaling voor de doorsnede eigenschappen van bladdeel F voor de 1D toets van de VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Doorsnede eigenschappen 1D toets

**Constructief**

Project: BJ7949 VO Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Versie: 1.0
Datum: 01/05/26
Onderwerp: Berekening doorsnede eigenschappen zone F VO Reefbrug voor 1D toets

## Doorsnede deel F



TP = Trailing Panel

SW = Shear Web

SC = Spar Cap

SW = Shear Web

LP = Leading Panel

## Afmetingen bladddelen

$t_{LP} := 13\ mm$ $h_{LP} := 350\ mm$

$t_{SC} := 25\ mm$ $h_{SC} := 500\ mm$

$t_{SW} := 8\ mm$ $b_{SW} := 300\ mm$

$t_{TP} := 11\ mm$ $h_{TP} := 800\ mm$

$z_{na} := 600\ mm$

$h := h_{LP} + h_{SC} + h_{TP} = (1.65 \cdot 10^{3})\ mm$

## Materiaal eigenschappen

$E_{LP} := 22.212\ GPa$ $G_{LP} := 2.935\ GPa$

$E_{SC} := 24.475\ GPa$ $G_{SC} := 2.866\ GPa$

$E_{SW} := 12.451\ GPa$ $G_{SW} := 2.824\ GPa$

$E_{TP} := 14.579\ GPa$ $G_{TP} := 3.076\ GPa$

## Samengestelde doorsneden eigenschappen

$EI_{LP} := E_{LP} \cdot \left(2 \cdot \frac{1}{12} \cdot t_{LP} \cdot h_{LP}^{3} + 2 \cdot t_{LP} \cdot h_{LP} \cdot \left(z_{na} - \frac{h_{LP}}{2}\right)^{2}\right) = 38.57\ MN \cdot m^{2}$ Buigstijfheid Leading Panel

$EI_{SC} := E_{SC} \cdot \left(2 \cdot \frac{1}{12} \cdot t_{SC} \cdot h_{SC}^{3} + 2 \cdot t_{SC} \cdot h_{SC} \cdot \left(z_{na} - h_{LP} - \frac{h_{SC}}{2}\right)^{2}\right) = 12.75\ MN \cdot m^{2}$ Buigstijfheid Spar Cap

$EI_{SW} := E_{SW} \cdot \left(2 \cdot \frac{1}{12} \cdot b_{SW} \cdot t_{SW}^{3} + 2 \cdot t_{SW} \cdot b_{SW} \cdot \left(\frac{h_{SC}}{2}\right)^{2}\right) = 3.74\ MN \cdot m^{2}$ Buigstijfheid Shear Web

$EI_{TP} := E_{TP} \cdot \left(2 \cdot \frac{1}{12} \cdot t_{TP} \cdot h_{TP}^{3} + 2 \cdot t_{TP} \cdot h_{TP} \cdot \left(h - \frac{h_{TP}}{2} - z_{na}\right)^{2}\right) = 122.09\ MN \cdot m^{2}$ Buigstijfheid Trailing Panel

$EI_{tot} := EI_{LP} + EI_{SC} + EI_{SW} + EI_{TP} = 177.15\ MN \cdot m^{2}$ Buigstijfheid Totaal

$\frac{EI_{LP}}{EI_{tot}} = 22\%$ $\frac{EI_{SW}}{EI_{tot}} = 2\%$ $\frac{EI_{SC}}{EI_{tot}} = 7\%$ $\frac{EI_{TP}}{EI_{tot}} = 69\%$ Stijfheid aandeel bladdeel

$GA := G_{LP} \cdot 2 \cdot t_{LP} \cdot h_{LP} + G_{SC} \cdot 2 \cdot t_{SC} \cdot h_{SC} + G_{TP} \cdot 2 \cdot t_{TP} \cdot h_{TP} = 152\ MN$ Samengesteldde schuifstijfheid

## Gemiddelde waardes (opsplitsen van EI naar E en I & GA naar G en A)

$E_{avg} := \frac{E_{LP} + E_{SC} + E_{SW} + E_{TP}}{4} = 18429\ MPa$ Gemiddelde rekmodulus

$I_{avg} := \frac{EI_{tot}}{E_{avg}} = 961245.134\ cm^{4}$ Gemiddelde buigstijfheid

$A := 2 \cdot t_{LP} \cdot h_{LP} + 2 \cdot h_{SC} \cdot t_{SC} + 2 \cdot b_{SW} \cdot t_{SW} + 2 \cdot h_{TP} \cdot t_{TP} = \left(56.50 \cdot 10^{-3}\right) m^{2}$ Oppervlakte doorsnede

$A_s := A - 2 \cdot b_{SW} \cdot t_{SW} = 517.00\ cm^{2}$ Oppervlakte doorsnede tegen schuifspanning

$G_{avg} := \frac{GA}{A_s} = 2950\ MPa$ Gemiddelde schuifmodulus

## Bepaling toelaatbare krachten en doorbuiging

$\varepsilon_{max} := 0.6\%$ $\gamma_{max} := 0.8\%$ Rekgrenzen

$z_{max} := h - z_{na} = 1.05\ m$ Afstand neutrale lijn tot locatie maximale spanning

$\kappa_{max} := \frac{\varepsilon_{max}}{z_{max}}$ kromminggrens

$M_{max} := EI_{tot} \cdot \frac{E_{TP}}{E_{avg}} \cdot \kappa_{max} = 801\ kN \cdot m$ Maximaal toelaatbare buigmoment(doorsnede)

$V_{max} := \gamma_{max} \cdot GA = 1220\ kN$ Maximaal toelaatbare schuifkracht(doorsnede)

$w_{max} := \frac{0.9 \cdot 18\ m}{100} = 162.00\ mm$ Maximaal toelaatbare doorbuigintg

## Bijlage II

# Rapportage SoFiSTiK

Berekeningen en resultaten E.E.A. in SoFiSTiK, model gebaseerd op 3d scan.

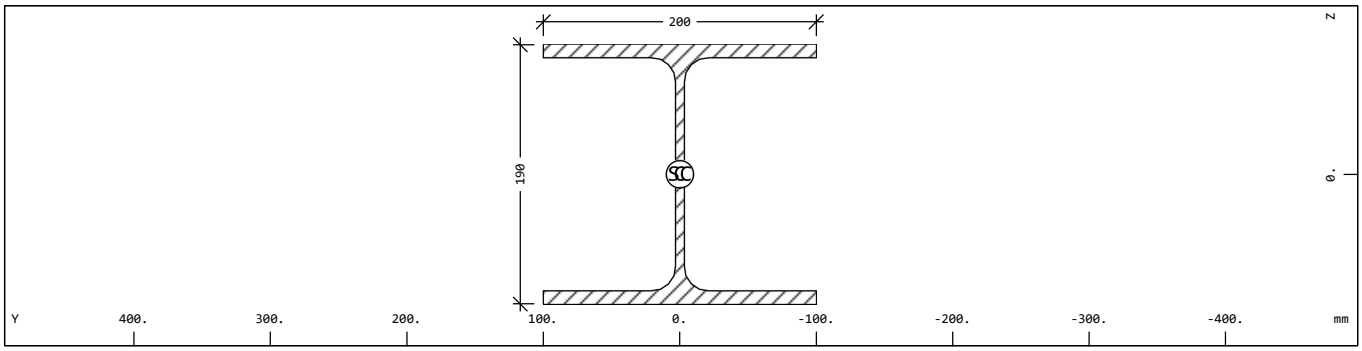
Haskoning
Enhancing Society Together

system definition
material and sections

**Materials**

| Mat | Classification |
|---|---|
| 1 | Leading Edge |
| 2 | Leading Panel |
| 3 | Spar Cap |
| 4 | Shear Wall |
| 5 | Trailing Panel |
| 6 | Traling Edge |
| 10 | S 355 (EN 1993) (mod) |
| 11 | S 355 (EN 1993) (mod) |

**Cross section No. 1 - HE 200 A (EN 10365)**




Cross section No. 1 - HE 200 A (EN 10365)

SOFiSTiK AG - www.sofistik.de

**Static properties of cross section**

| SNo | Mat | A[m2] | Ay[m2] | Iy[m4] | yc[mm] | ysc[mm] | E[N/mm2] | g[kg/m] | I-1[m4] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MRf | It[m4] | Az[m2] | Iz[m4] | zc[mm] | zsc[mm] | G[N/mm2] | | I-2[m4] |
| | | | Ayz[m2] | Iyz[m4] | | | | | α[°] |
| 1 | 10 | 5.3848E-03 | 3.650E-03 | 3.693E-05 | 0.0 | 0.0 | 210000 | 42.3 | |
| | | 2.048E-07 | 1.207E-03 | 1.336E-05 | 0.0 | 0.0 | 80769 | (CENTR) | |
| = HE 200 A (EN 10365) | | | | | | | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| SNo | section number | yc[mm],zc[mm] | ordinate of elastic centroid |
| Mat | material number | ysc[mm],zsc[mm] | ordinate of shear centre |
| A[m2] | sectional area | E[N/mm2] | Young's modulus |
| Ay[m2],Az[m2],Ayz[m2] | transverse shear deformation area | g[kg/m] | mass per length |
| Iy[m4],Iz[m4],Iyz[m4] | bending moment of inertia | | |
| I-1[m4],I-2[m4],α[°] | principal moments of inertia and angle of the principal axes | | |
| MRf | reinforcement material number | | |
| It[m4] | torsional moment of inertia | | |
| G[N/mm2] | Shear modulus | | |

**Design forces and moments**

| | N[kN] | Vy[kN] | Vz[kN] | Mt[kNm] | Mt2[kNm] | Mb[kNm2] | My[kNm] | Mz[kNm] | y[mm] | z[mm] | BUCK |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P[1,2] | 1265.4 | 542.71 | 245.32 | 3.78 | 48.84 | 4.23 | 100.96 | 47.90 | 0.0 | 0.0 | -, b, c |
| E[3,2] | 1265.4 | 334.13 | 151.63 | 1.47 | 29.79 | 2.64 | 91.35 | 31.39 | 0.0 | 0.0 | |

[1] P = plastic design values (ultimate bearing capacity)
[2] Material safety γ-M0 for structural steel = 1.00
[3] E = elastic design values (stress limit reached)

| | | | |
|---|---|---|---|
| N[kN] | normal force | Mb[kNm2] | warping moment |
| Vy[kN],Vz[kN] | shear force | My[kNm],Mz[kNm] | bending moment |
| Mt[kNm] | primary torsional moment | y[mm],z[mm] | ordinate of plastic centre |
| Mt2[kNm] | secondary torsional moment | BUCK | buckling curve (LTB, y-y, z-z) |

system definition
gelijkmatig verdeelde belasting

**Load Case 100 Mensenmassa**

Factor forces and moments 1.000

**Loads**

| Kind | Reference to | Projection Designation | W[m] | Coordinates X[m] | Y[m] | Z[m] | Type | Load value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Area | QGRP 101 | ZZ | 1.000 | 4.000 | -1.250 | 0.000 | PZZ | -4.75 [kN/m2] |
| | | | | 4.000 | 1.250 | 0.000 | | -4.75 [kN/m2] |
| | | | | 18.000 | 1.250 | 0.000 | | -4.75 [kN/m2] |
| | | | | 18.000 | -1.250 | 0.000 | | -4.75 [kN/m2] |
| | | | | | | activated | | 100.00 percent |

SOFiSTiK AG - www.sofistik.de

system definition
gr1 en 2 horizontaal

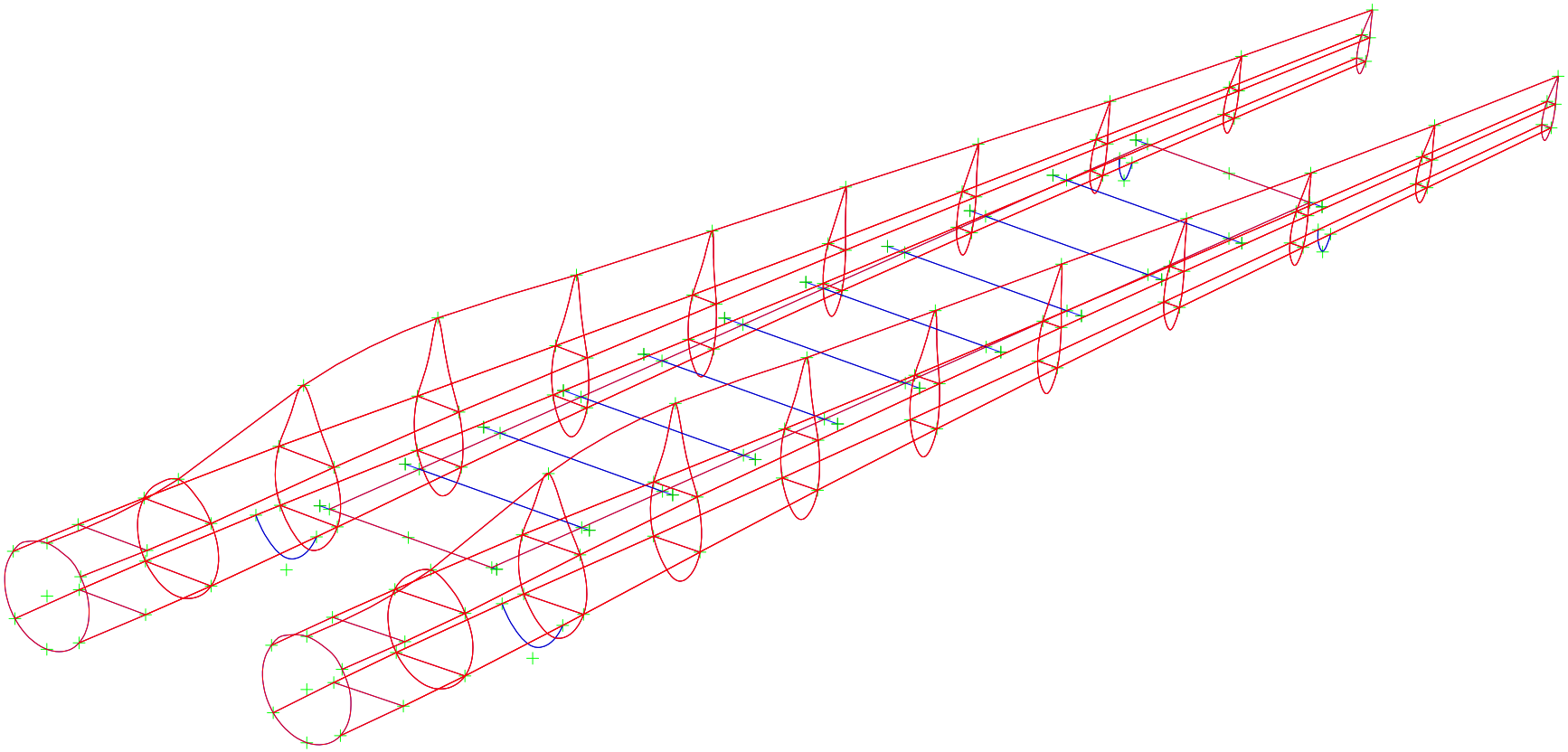
**Load Case 400 hori**

Factor forces and moments 1.000

**Loads**

| Kind | Reference to | Projection Designation | W[m] | Coordinates X[m] | Y[m] | Z[m] | Type | Load value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Line | QGRP 101 | ZZ | 1.000 | 4.000 | 0.000 | 0.000 | PXX | 1.19 [kN/m] |
| | | | | 18.000 | 0.000 | 0.000 | | 1.19 [kN/m] |
| | | | | | | activated | | 100.00 percent |

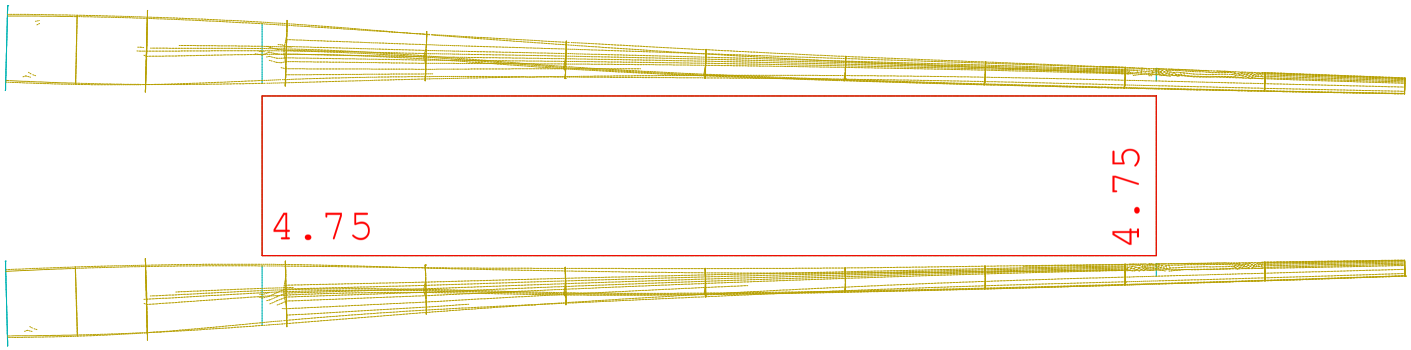
SOFiSTiK AG - www.sofistik.de



Structural Elements

Z
Y X

M 1 : 78
X * 0.732
Y * 0.790
Z * 0.917



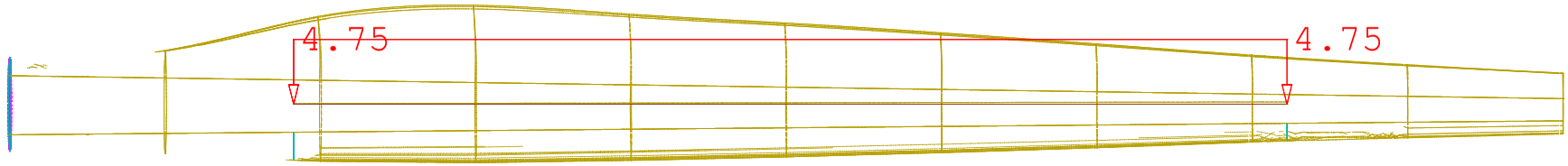

Y
Z—X

Sector of system Quadrilateral Elements

M 1 : 118

Free load in global Z, Loadcase 100  Mensenmassa  , (1 cm 3D = unit) Free area load (force) in global Z (Unit=5.00 kN/m2

(Min=-4.75) (Max=-4.75)



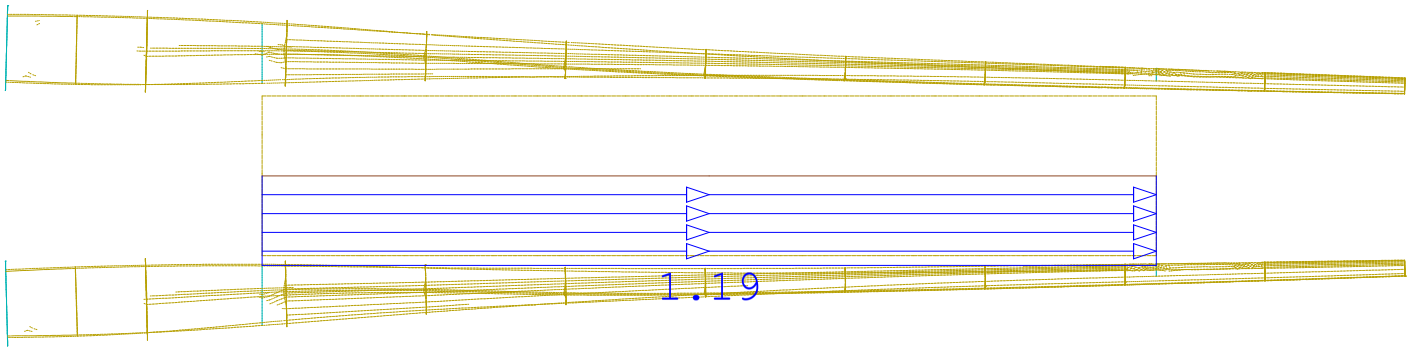

Z
Y—X

Sector of system Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 92...95 101

M 1 : 96

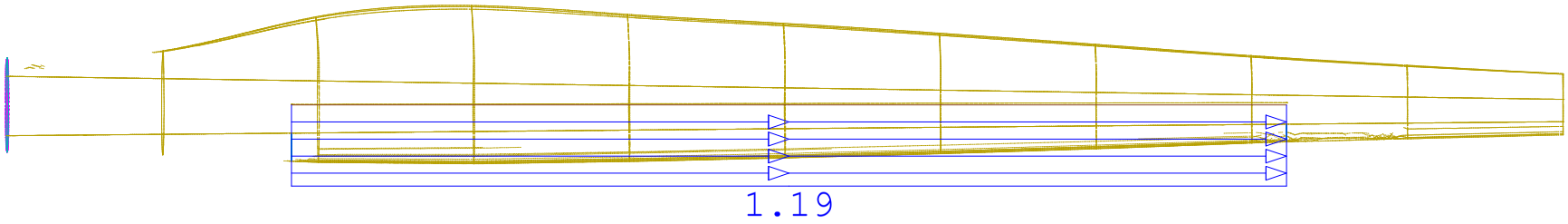
Free load in global Z, Loadcase 100  Mensenmassa  , (1 cm 3D = unit) Free area load (force) in global Z (Unit=5.00 kN/m2

(Min=-4.75) (Max=-4.75)



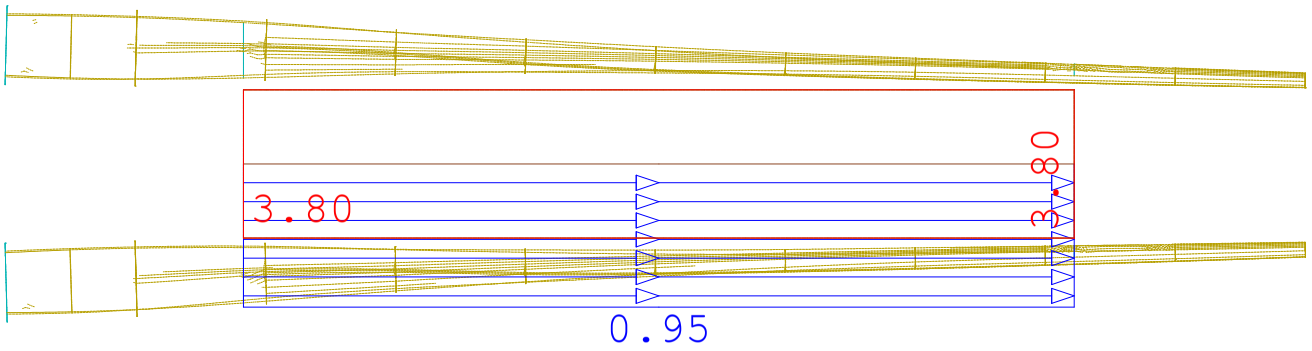

Y
Z—X Sector of system Quadrilateral Elements M 1 : 118

Free load in global X, Loadcase 400 hori , (1 cm 3D = unit) Free line load (force) in global X (Unit=1.00 kN/m ) (Max=1.19)




Z
Y—X Sector of system Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 92...95 101 M 1 : 96

Free load in global X, Loadcase 400 hori , (1 cm 3D = unit) Free line load (force) in global X (Unit=1.00 kN/m ) (Max=1.19)

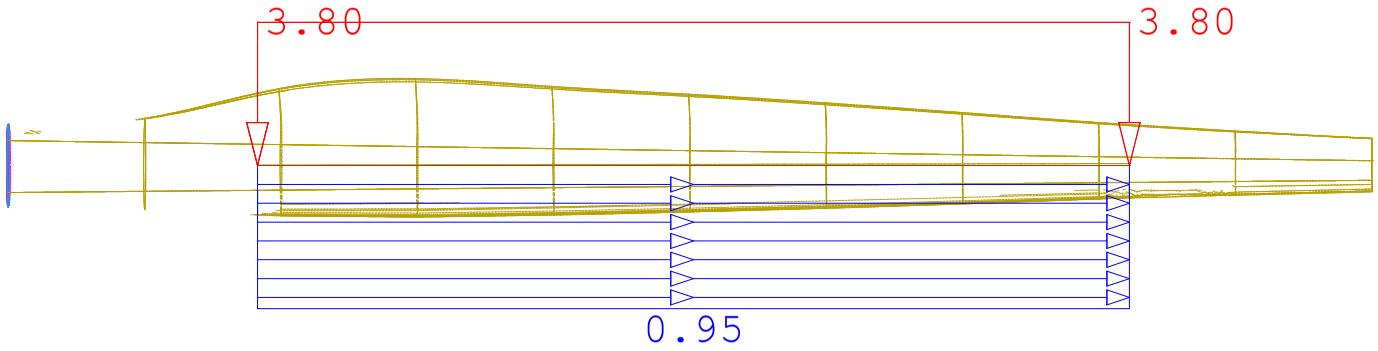



Y
Z—X

Sector of system Quadrilateral Elements

M 1 : 127

Free load in global directions, Loadcase 2000  BGT Mensenmassa  , (1 cm 3D = unit) Free line load (force) in global X (Unit=0.50 kN/m,Max=0.95 ), Free area load (force) in global Z (Unit=2.00 kN/m2,Min=-3.80 Max=-3.80 )

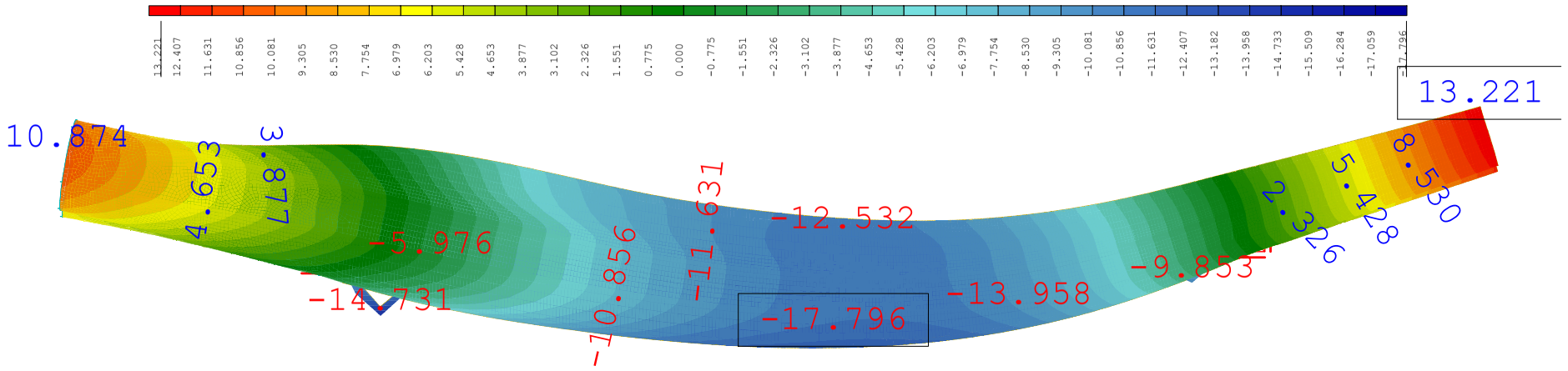



Z
Y—X

Sector of system Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 92...95 101

M 1 : 121

Free load in global directions, Loadcase 2000  BGT Mensenmassa  , (1 cm 3D = unit) Free line load (force) in global X (Unit=0.50 kN/m,Max=0.95 ), Free area load (force) in global Z (Unit=2.00 kN/m2,Min=-3.80 Max=-3.80 )



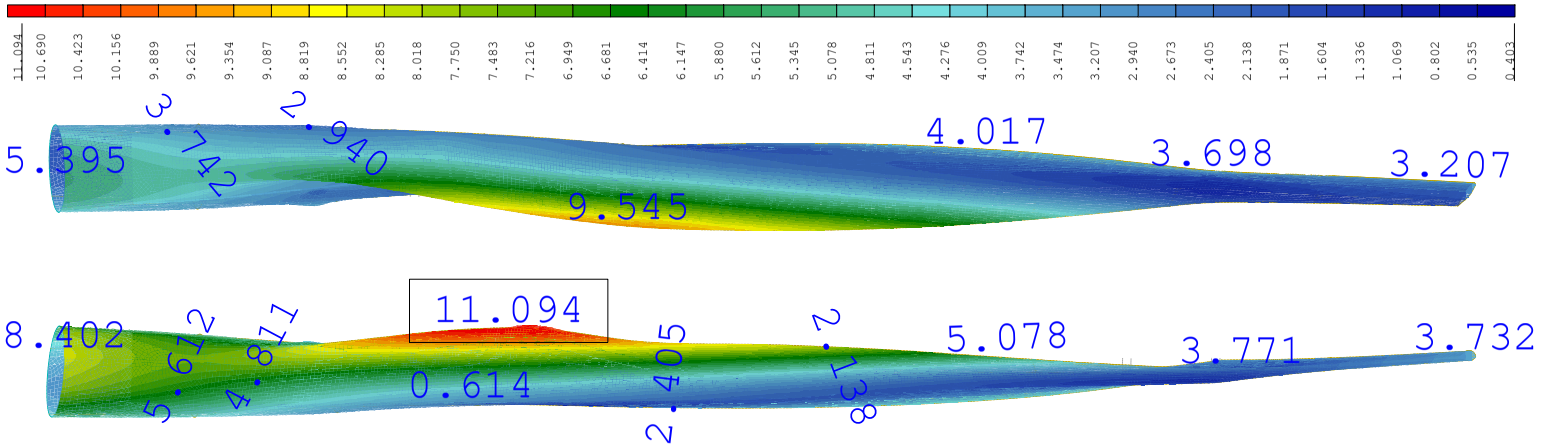

Z
Y X

Sector of system Beam Elements,Quadrilateral Elements,Supporting Lines

Deformed Structure from LC 2000 BGT Mensenmassa Enlarged by 100.00

Nodal displacement in global Z ↕ , Loadcase 2000 BGT Mensenmassa , from -17.796 to 13.221 step 0.775 mm

M 1 : 97



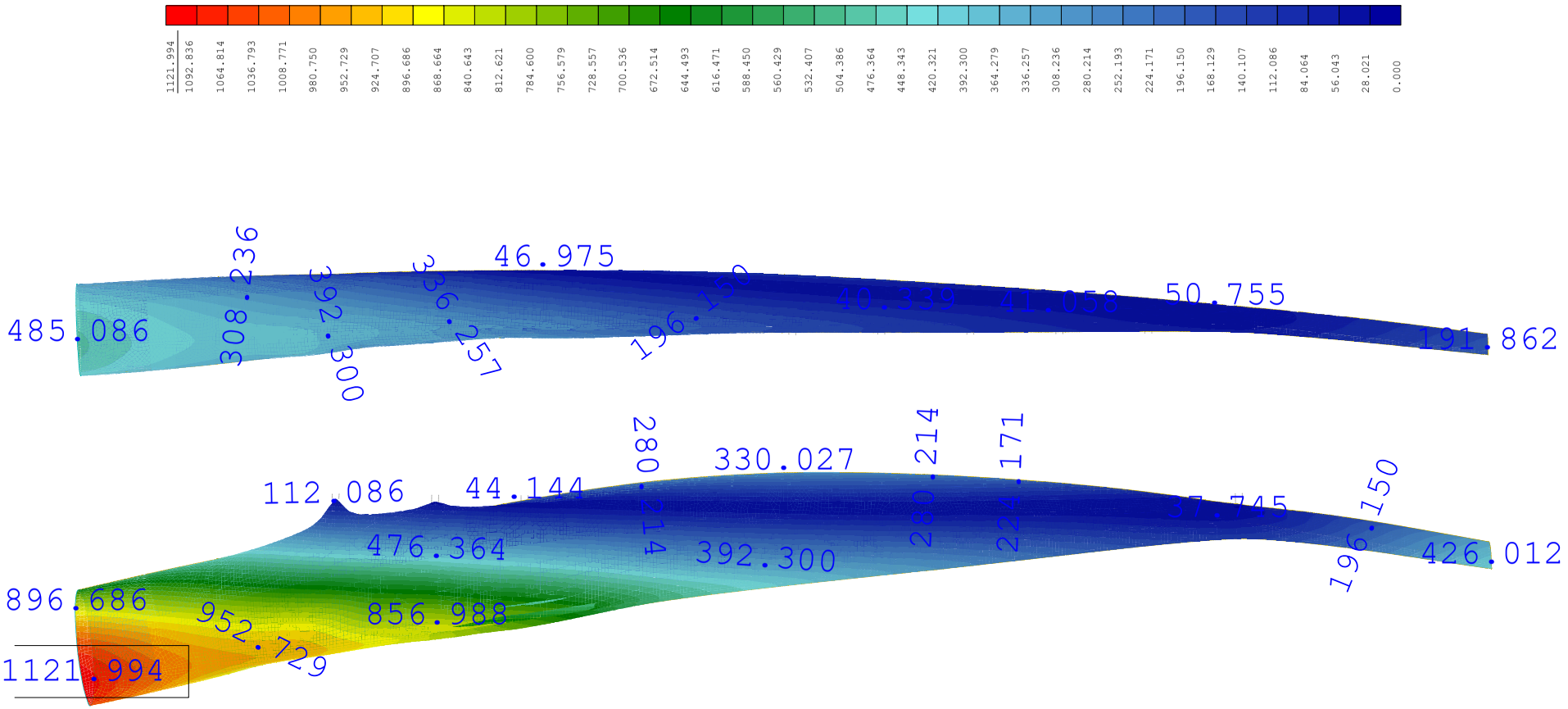

Y
Z X

Sector of system Quadrilateral Elements Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 92...95

Deformed Structure from LC 2000 BGT Mensenmassa Enlarged by 100.00

Nodal displacement vector in the global XY plane, Loadcase 2000 BGT Mensenmassa , from 0.403 to 11.094 step 0.267 mm

M 1 : 117



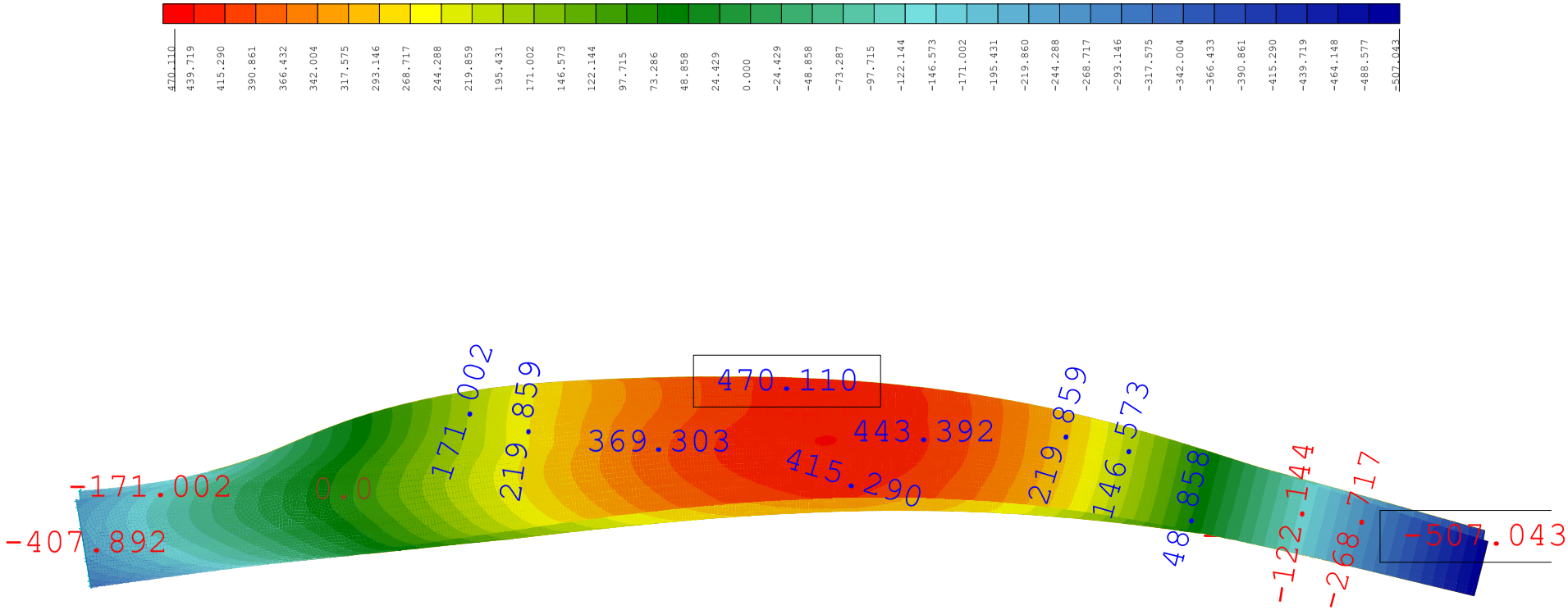

Y
Z—X

Sector of system Quadrilateral Elements Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 92...95

M 1 : 96

Deformed Structure from LC 10000 Eigenform 1 4.88 Hz Enlarged by 2.0000

Nodal displacement vector in the global XY plane, Loadcase 10000 Eigenform 1 4.88 Hz , from 1.136 to 1121.994 step 28.021 mm



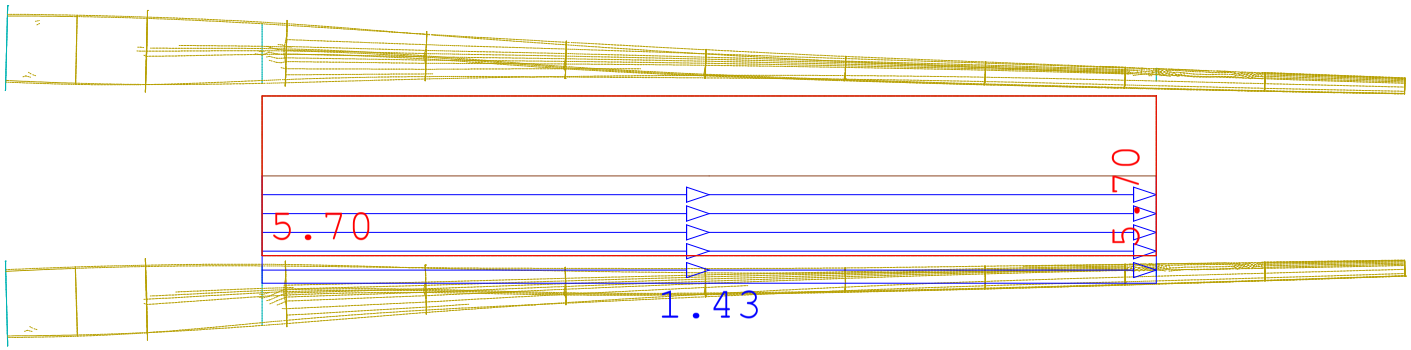

Z
Y X

Sector of system Beam Elements,Quadrilateral Elements,Supporting Lines

Deformed Structure from LC 10002 Eigenform 3 5.62 Hz Enlarged by 2.0000

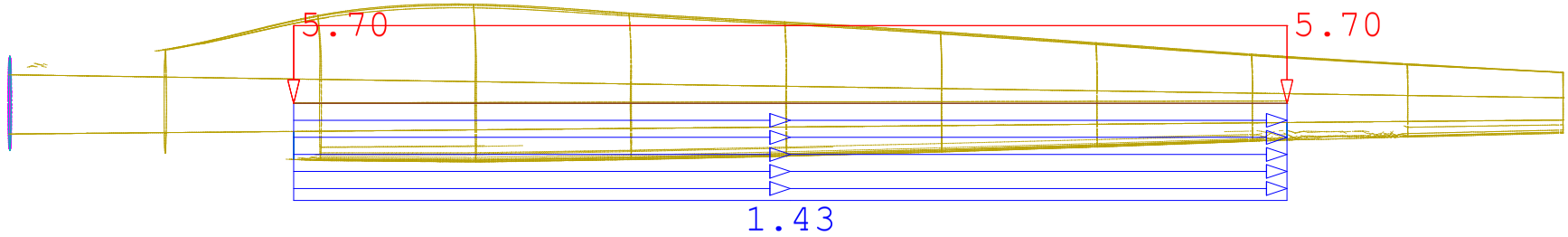
Nodal displacement in global Z , Loadcase 10002 Eigenform 3 5.62 Hz , from -507.043 to 470.110 step 24.429 mm

M 1 : 97



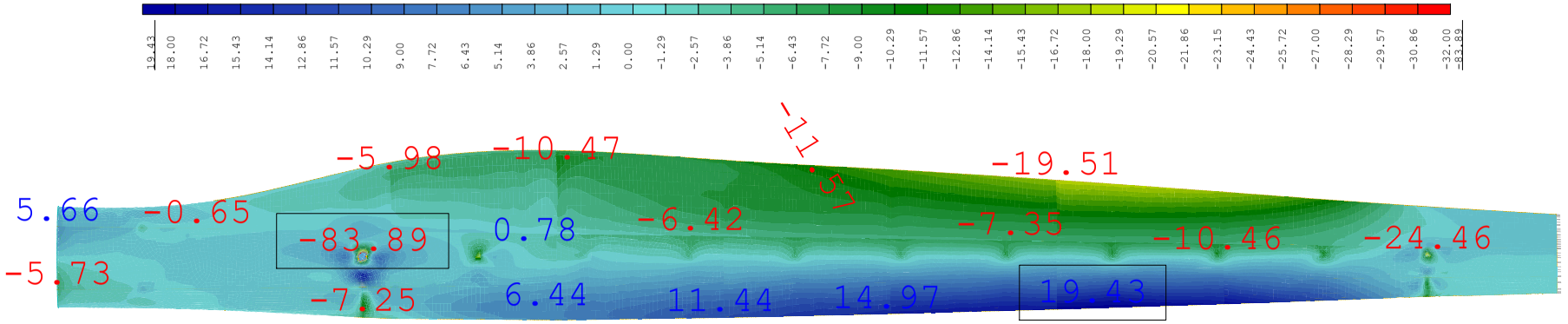

Y
Z X Sector of system Quadrilateral Elements M 1 : 118

Free load in global directions, Loadcase 3000 UGT Mensenmassa , (1 cm 3D = unit) Free line load (force) in global X (Unit=1.00 kN/m,Max=1.43 ), Free area load (force) in global Z (Unit=5.00 kN/m2,Min=-5.70 Max=-5.70 )



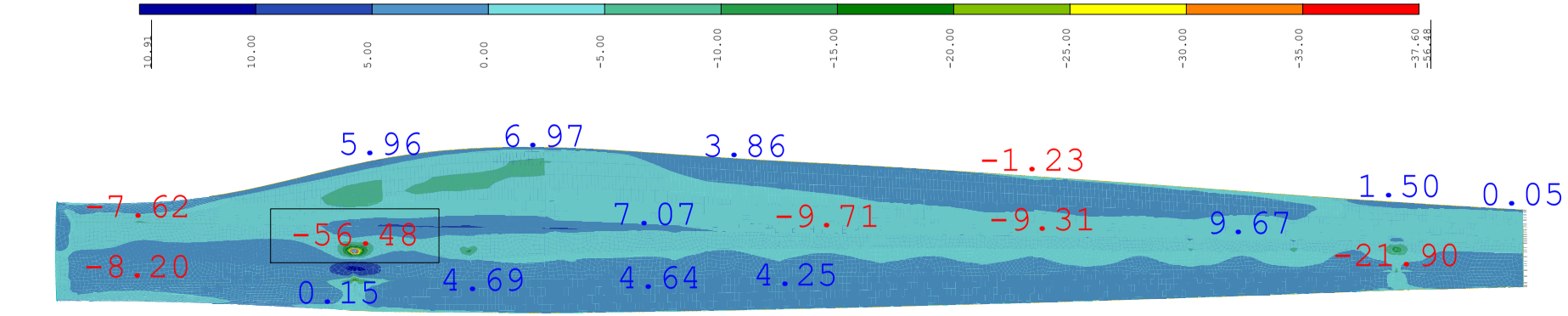

Z
Y X Sector of system Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 92...95 101 M 1 : 96

Free load in global directions, Loadcase 3000 UGT Mensenmassa , (1 cm 3D = unit) Free line load (force) in global X (Unit=1.00 kN/m,Max=1.43 ), Free area load (force) in global Z (Unit=5.00 kN/m2,Min=-5.70 Max=-5.70 )



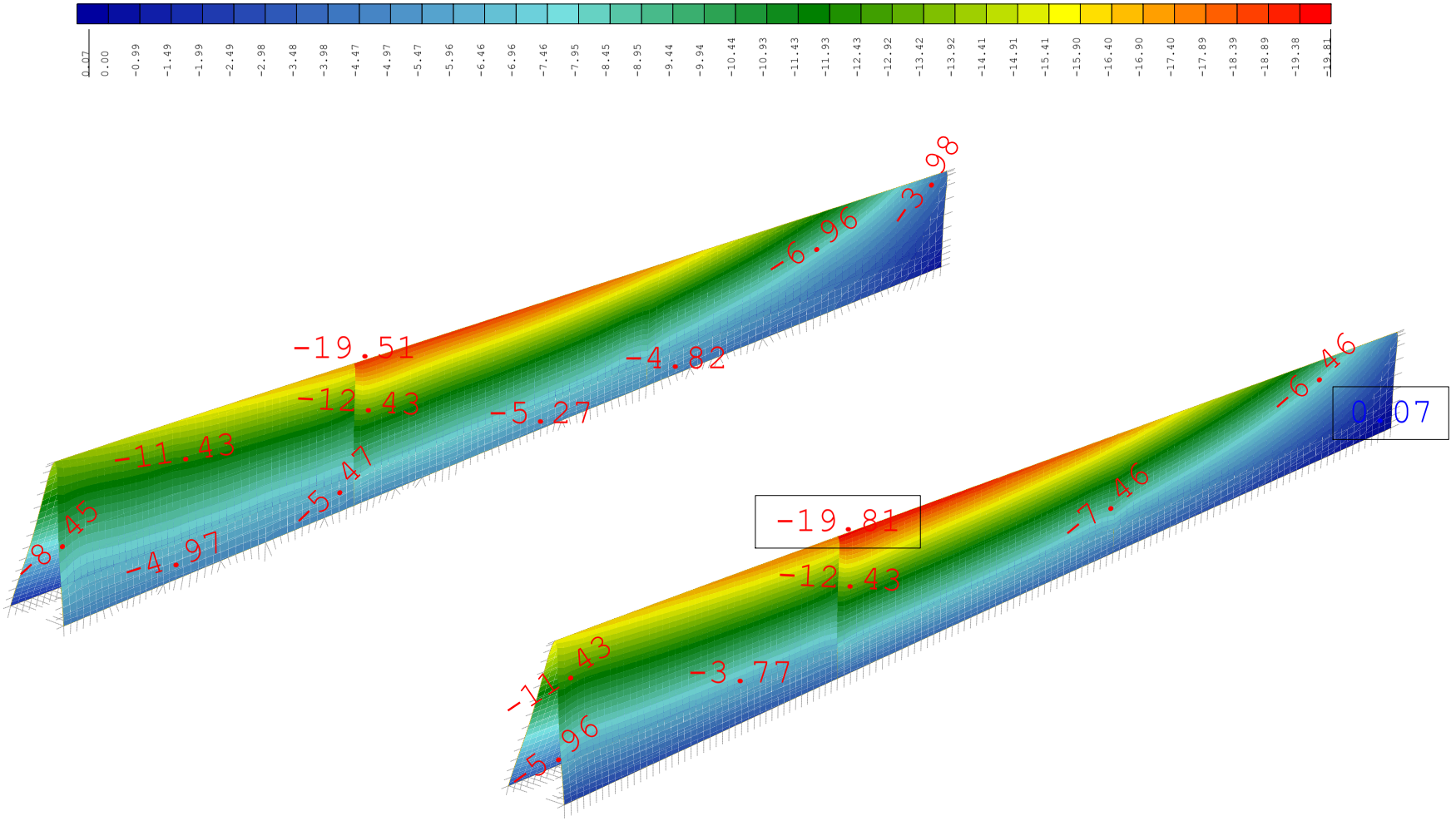

Z
Y X Sector of system Quadrilateral Elements Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 M 1 : 86

Bottom Stress in local x in Node, Loadcase 3000 UGT Mensenmassa , from -32.00 to 19.43 step 1.29 MPa




Z
Y X Sector of system Quadrilateral Elements Group 2...5 12...15 22...25 32...35 42...45 52...55 62...65 72...75 82...85 M 1 : 86

Bottom Stress in local y in Node, Loadcase 3000 UGT Mensenmassa , from -37.60 to 10.91 step 5.00 MPa

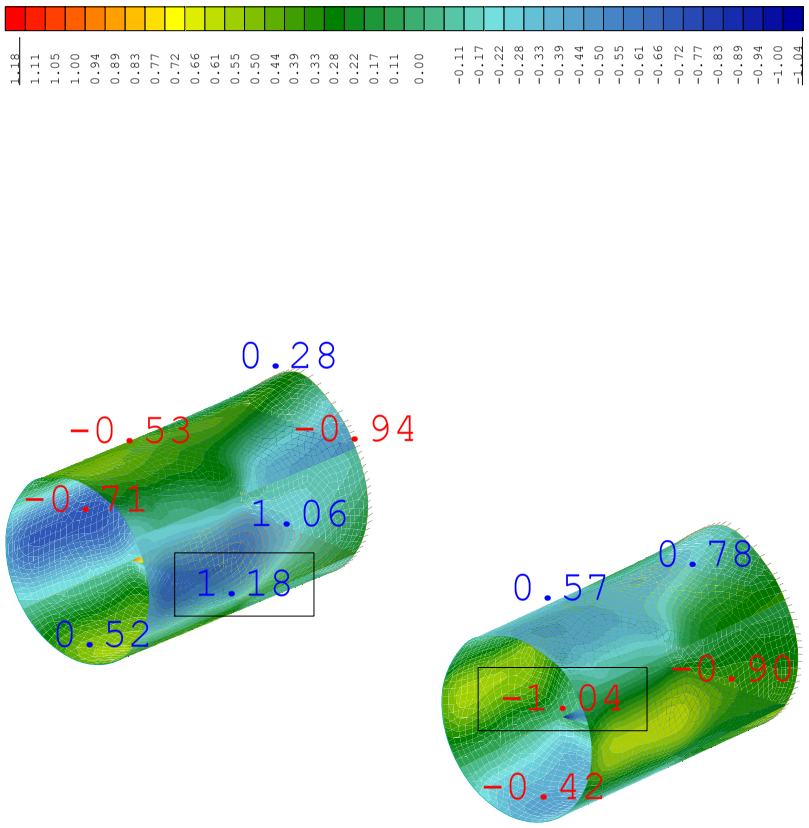



Sector of system Quadrilateral Elements Group 55 65 75

Bottom Stress in local x in Node, Loadcase 3000 UGT Mensenmassa , from -19.81 to 0.07 step 0.50 MPa

M 1 : 32

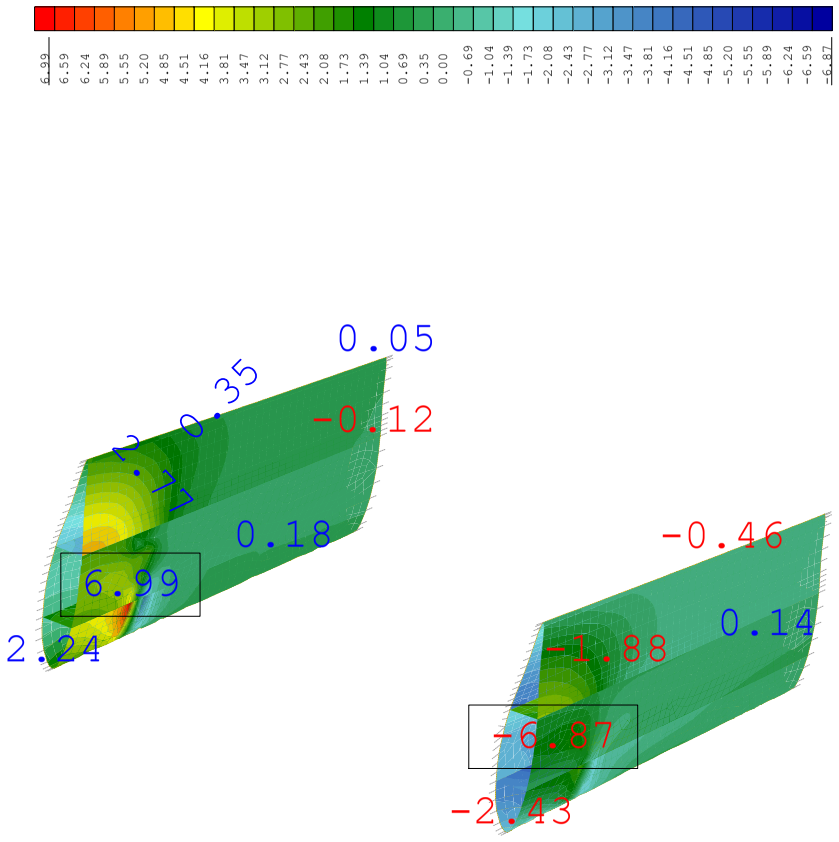
X * 0.732
Y * 0.790
Z * 0.917




Z
Y X

Sector of system Quadrilateral Elements Group 2...5
Membrane shear stress tau-xy in Node, Loadcase 3000 UGT
Mensenmassa , from -1.04 to 1.18 step 0.06 MPa

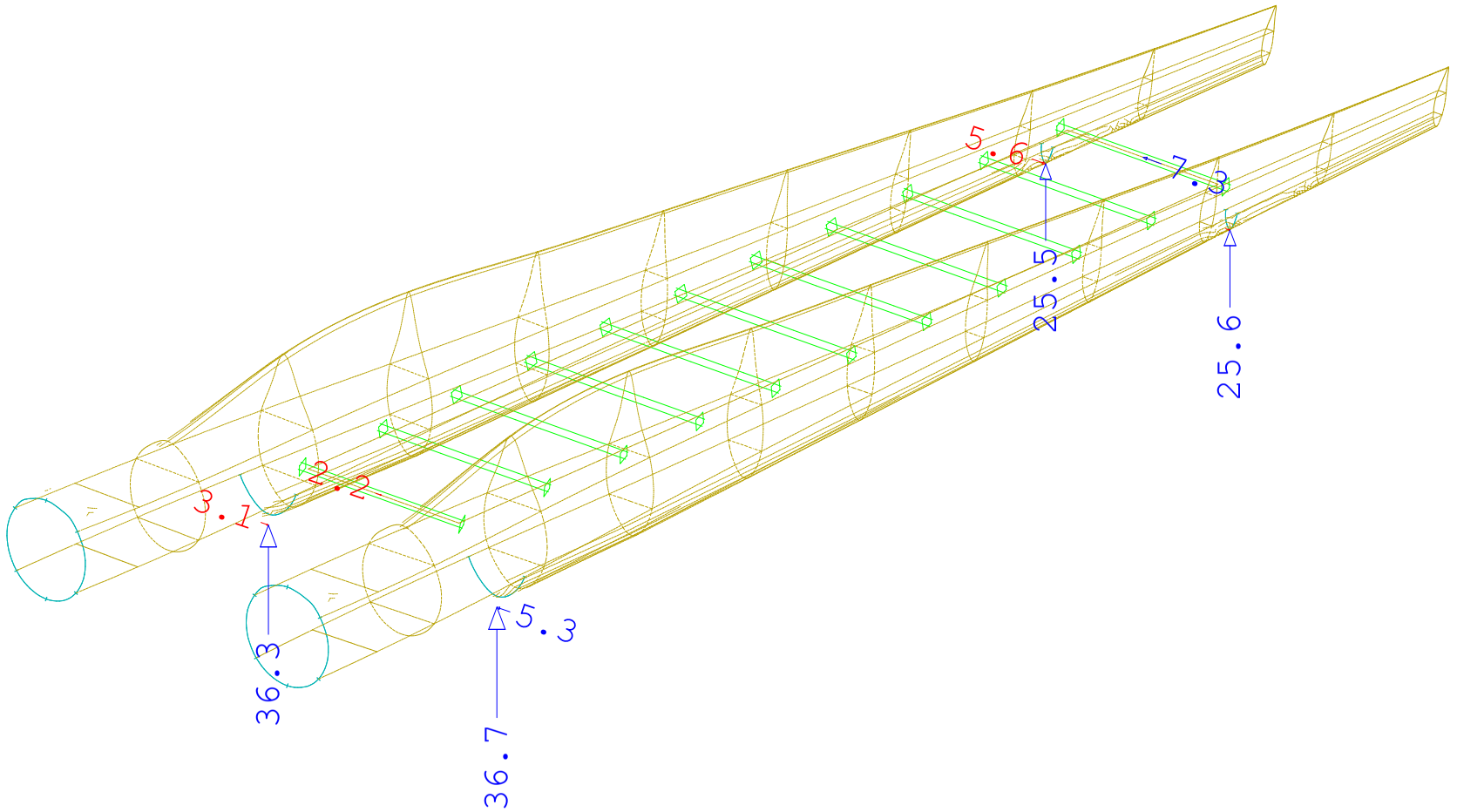
M 1 : 51
X * 0.732
Y * 0.790
Z * 0.917




Z
Y X

Sector of system Quadrilateral Elements Group 82...85
Membrane shear stress tau-xy in Node, Loadcase 3000 UGT
Mensenmassa , from -6.87 to 6.99 step 0.35 MPa

M 1 : 38
X * 0.732
Y * 0.790
Z * 0.917

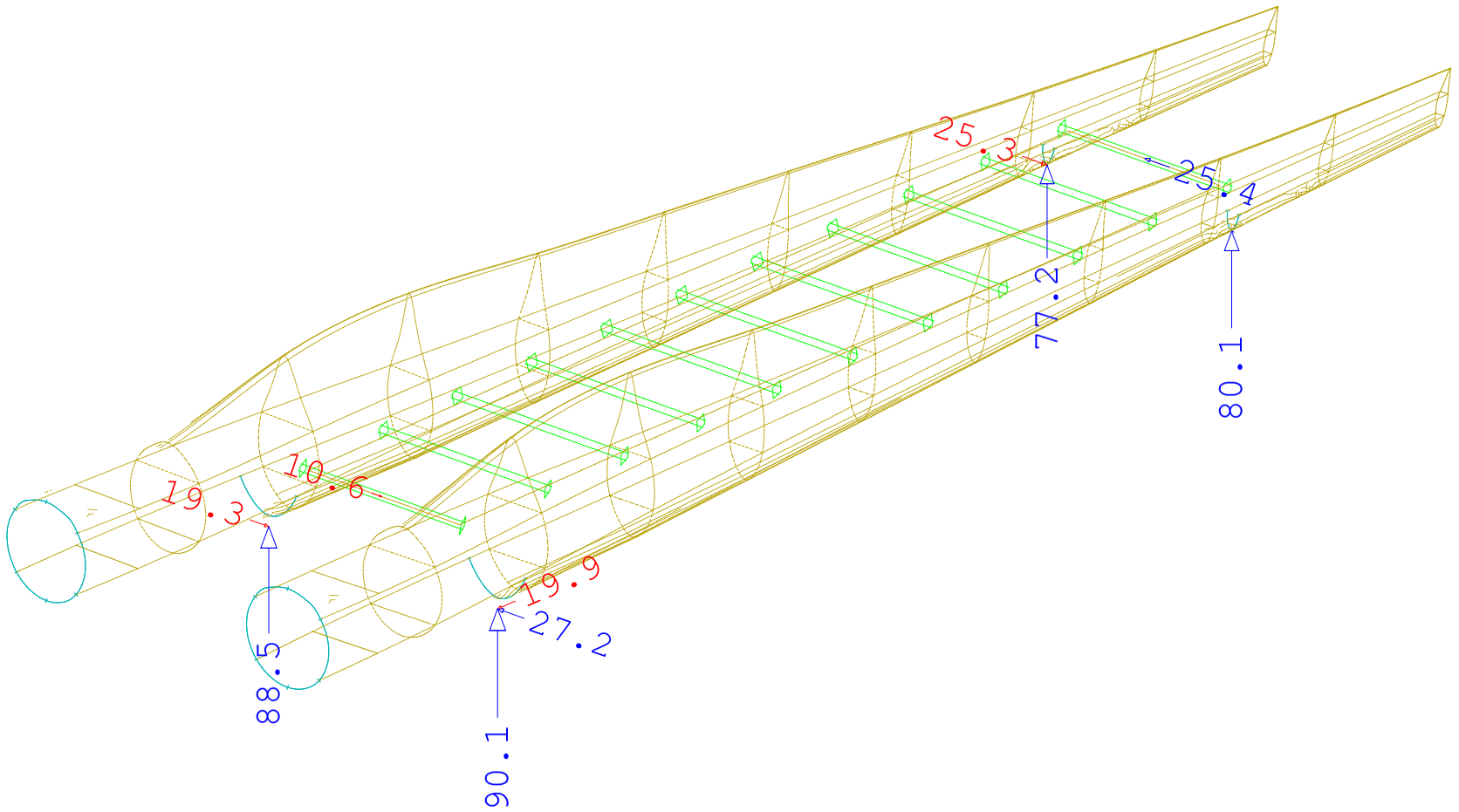



Z
Y X

Sector of system Beam Elements,Quadrilateral Elements,Supporting Lines
Nodes , Support force components in global directions, Loadcase 1000 E.G. , 1 cm 3D = 20.000 kN
(total: 0/0/124.08)

(Min=-5.6) (Max=36.7)

M 1 : 81
X * 0.732
Y * 0.790
Z * 0.917




Z
Y X

Sector of system Beam Elements,Quadrilateral Elements,Supporting Lines
Nodes , Support force components in global directions, Loadcase 3000 UGT Mensenmassa , 1 cm 3D = 50.000 kN
(Max=90.1) (total: -19.9/0/335.99)

(Min=-25.3)

M 1 : 81
X * 0.732
Y * 0.790
Z * 0.917

# Bijlage III

## VO Toetsing kritieke drukspanning

Bepaling voor kritieke drukspanning in midden van de overspanning, VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Kritieke drukspanning

**Structural**

Project: BJ7949 Vo Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Version: 1.0
Date: 24/07/26
Subject: Bepaling kritieke drukspanning drukzone VO Reefbrug

## Materiaaleigenschappen

Materiaaleigenschappen voor sandwichpaneel dat deel is van trailing panel van de windturbineligger voor Reefbrug. out = laminaat buitenzijde, core = schuim tussen laminaten, in = laminaat binnenzijde. $E_x$, $E_y$, $E_z$ = rekmodulus in lokale x,y en z richting respectieveljk. $G_{xy}$ = schuifmodulus in x-y vlak. $\nu_{xy}$= poisson's ratio van x naar y en t is laagdikte.

$E_{x;out} := 14588.8\ MPa$ $E_{x;core} := 55\ MPa$ $E_{x;in} := 12714.4\ MPa$

$E_{y;out} := 10455.7\ MPa$ $E_{y;core} := 55\ MPa$ $E_{y;in} := 12714.4\ MPa$

$G_{xy;out} := 3080.5\ MPa$ $E_{z;core} := 55\ MPa$ $G_{xy;in} := 3087.4\ MPa$

$\nu_{xy;out} := 0.238$ $G_{xy;core} := 16\ MPa$ $\nu_{xy;in} := 0.201$

$\nu_{yx;out} := 0.171$ $G_{iz;core} := 16\ MPa$ $\nu_{yx;in} := 0.201$

$t_{out} := 9\ mm$ $t_{core} := 35\ mm$ $t_{in} := 1.8\ mm$

## Materiaal en conversiefactoren

$\eta_{ct} := 0.9$ Conversiefactor temperatuur

$\eta_{cm} := 0.7$ Conversiefactor waterdamp

$\eta_{cf} := 0.9$ Conversiefactor vermoeiing

$\eta_c := \eta_{ct} \cdot \eta_{cm} \cdot \eta_{cf} = 0.57$ Conversiefactor totaal

$\gamma_M := 1.4 \cdot 1.35 = 1.89$ Materiaalfactor

## Rekenwaardes materiaaleigenschappen

$E_{x;out;D} := E_{x;out} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 4.38\ GPa$ $E_{x;core;D} := E_{x;core} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 16.50\ MPa$ $E_{x;in;D} := E_{x;in} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 3.81\ GPa$

$E_{y;out;D} := E_{y;out} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 3.14\ GPa$ $E_{y;core;D} := E_{y;core} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 16.50\ MPa$ $E_{y;in;D} := E_{y;in} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 3.81\ GPa$

$G_{xy;out;D} := G_{xy;out} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 0.92\ GPa$ $E_{z;core;D} := E_{z;core} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 16.50\ MPa$ $G_{xy;in;D} := G_{xy;in} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 0.93\ GPa$

$G_{xy;core;D} := G_{xy;core} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 4.80\ MPa$

$G_{iz;core;D} := G_{iz;core} \cdot \frac{\eta_c}{\gamma_M} = 4.80\ MPa$

## Doorsnede eigenschappen

$$z_{n.a;x} := \frac{E_{x;out;D} \cdot \frac{t_{out}^{2}}{2} + E_{x;in;D} \cdot t_{in} \cdot \left( t_{out} + t_{core} + \frac{t_{in}}{2} \right)}{E_{x;out;D} \cdot t_{out} + E_{x;in} \cdot t_{in}} = 7.80 \text{ mm}$$ Hoogte neutrale as x-richting

$$z_{n.a;y} := \frac{E_{y;out;D} \cdot \frac{t_{out}^{2}}{2} + E_{y;in;D} \cdot t_{in} \cdot \left( t_{out} + t_{core} + \frac{t_{in}}{2} \right)}{E_{y;out;D} \cdot t_{out} + E_{y;in;D} \cdot t_{in}} = 12.40 \text{ mm}$$ Hoogte neutrale as y-richting

$$EI_x := E_{x;out;D} \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot t_{out}^{3} + t_{out} \cdot \left( z_{n.a;x} - \frac{t_{out}}{2} \right)^{2} \right) \dots + E_{x;in;D} \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot t_{in}^{3} + t_{in} \cdot \left( \frac{t_{in}}{2} + t_{out} + t_{core} - z_{n.a;x} \right)^{2} \right) = 10.15 \text{ kN} \cdot \text{m}$$ Stijfheid doorsnede x-richting

$$EI_y := E_{y;out;D} \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot t_{out}^{3} + t_{out} \cdot \left( z_{n.a;y} - \frac{t_{out}}{2} \right)^{2} \right) \dots + E_{y;in;D} \cdot \left( \frac{1}{12} \cdot t_{in}^{3} + t_{in} \cdot \left( \frac{t_{in}}{2} + t_{out} + t_{core} - z_{n.a;y} \right)^{2} \right) = 9.21 \text{ kN} \cdot \text{m}$$ Stijfheid doorsnede y-richting

$$GS := G_{xy;out;D} \cdot t_{out}^{3} + G_{xy;in;D} \cdot t_{in}^{3} = 679.11 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$ Samengestelde afschuifstijfheid

## Onderdelen stijfheidsmatrix

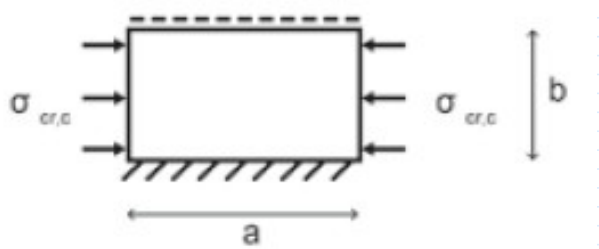
$$D_{11} := \frac{EI_x}{12 \cdot \left( 1 - \nu_{xy;out} \cdot \nu_{yx;out} \right)} = 0.882 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$D_{22} := \frac{EI_y}{12 \cdot \left( 1 - \nu_{xy;out} \cdot \nu_{yx;out} \right)} = 0.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$D_{66} := \frac{GS}{12} = \left( 56.59 \cdot 10^{3} \right) \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$D_{12} := \nu_{xy;out} \cdot D_{22} = \left( 190.34 \cdot 10^{3} \right) \text{ N} \cdot \text{mm}$$

## Geometrie drukvlak




$t := t_{out} = 9.00 \text{ mm}$

Hoekpunten drukvlak gemeten in sofistik

| | | | |
|---|---|---|---|
| $x_1 := 12.08 \text{ m}$ | $y_1 := -1.558 \text{ m}$ | $z_1 := 0.40 \text{ m}$ | Punt "rechtsonder" |
| $x_2 := 13.89 \text{ m}$ | $y_2 := -1.735 \text{ m}$ | $z_2 := 0.88 \text{ m}$ | Punt "linksboven" |
| $\Delta x := x_2 - x_1$ | $\Delta y := y_2 - y_1$ | $\Delta z := z_2 - z_1$ | Afstand tussen punten |

$a := \Delta x = 1.81\ m$ Lengte drukpaneel

$b := \sqrt{\Delta z^2 + \Delta y^2} = 512\ mm$ Hoogte drukpaneel

## Bepaling kritieke drukspanning

$$\sigma_{cr;c} := \frac{\pi^2}{t \cdot b^2} \cdot \left(3.125 \cdot \sqrt{D_{11} \cdot D_{22}} + 2.33 \cdot \left(D_{12} + 2 \cdot D_{66}\right)\right) = 13.96\ MPa$$

$$F_{cr} := \sigma_{cr;c} \cdot t = 125.61\ \frac{kN}{m}$$

## Bepaling Face sheet wrinkling

$$f_{wr;k} := 0.65 \cdot \sqrt[3]{E_{x;in;D} \cdot E_{z;core;D} \cdot G_{iz;core;D}} = 43.61\ MPa$$

## Toets drukspanning

$\sigma_{cr;Ed} := 12\ MPa$

$$u.c._{\sigma;cr} := \frac{\sigma_{cr;Ed}}{\sigma_{cr;c}} = 0.86$$

# Bijlage IV

## VO Toetsing leuning en randbalk

Bepaling voor randbalk en leuning VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Toetsing leuning, randbalk en verbinding randbalk met dwarsdrager

**Structural**

Project: BJ7949 VO Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Version: 1.0
Date: 27/07/26
Subject: Bepalingen leuning, randbalk en verbinding met dwarsbalk VO Reefbrug

## Geometrie

$L := 2.0\ m$ — Afstand leuning tussen verbindingen

$h := 1.0\ m$ — Hoogte leuning

$t_{spijl} := 3\ mm$ — Dikte spijl persrooster

$h_{spijl} := 40\ mm$ — Hoogte spijl persrooster

$hoh_{spijl} := 50\ mm$ — Maasgrootte persrooster

$I_{spijl} := \frac{1}{12} \cdot t_{spijl} \cdot h_{spijl}^{3} = 1.60\ cm^{4}$ — Buigstijfheid spijl persrooster

$W_{spijl} := \frac{1}{6} \cdot t_{spijl} \cdot h_{spijl}^{2}$ — Buigweerstand spijl persrooster

$t_{dek} := 80\ mm$ — Dekdikte

### Profiel eigenschappen PFC; randbalk

$h_{PFC} := 200\ mm$ $b_{PFC} := 90\ mm$ $t_{f;PFC} := 11.5\ mm$ $t_{w;PFC} := 7.0\ mm$ $r_{1;PFC} := 12\ mm$

$I_{T;PFC} := 18.29\ cm^{4}$ $I_{W;PFC} := 19700\ cm^{6}$ $W_{PFC} := 252.30\ cm^{3}$

### Profiel eigenschappen HEA; dwarsdrager

$h_{HEA} := 133\ mm$ $b_{HEA} := 140\ mm$ $t_{f;HEA} := 8.5\ mm$ $t_{w;HEA} := 5.5\ mm$

## Materiaal eigenschappen

$E := 210\ GPa$ — Young's modulus staal

$G := 81\ GPa$ — Afschuif modulus staal

$f_y := 355\ MPa$ — Vloeisterkte staal

$f_u := 510\ MPa$ — Uiterste sterkte staal

$\gamma_{M0} := 1.0$ $\gamma_{M2} := 1.25$ — Materiaal factoren

## Belasting

$q := 1\ \frac{kN}{m}$ — Lijnlast bovenzijde leuning

$\gamma_Q := 1.2$ — Belastingsfactor opgelegde belasting

$\gamma_u := 0.8$ — Belastingsfactor vervorming

## Grenzen

$u_{h;max} := 20\ mm$ — Maximaal toegestane horizontale verplaatsing leuning

## Controle horizontale vervorming leuning + randbalk

Boutverbinding + verstijving in randbalk zorgen voor torsiestijve verbinding op dwarsdrager. Torderen van de randbalk gebaseerd op (SCI publication 385, Design of steel beams in torsion, 2011)

$$T_{Ed} := \gamma_u \cdot q \cdot \left(h + \frac{h_{PFC}}{2}\right) \cdot \frac{L}{2} = \left(880.00 \cdot 10^{-3}\right)\ kN \cdot m$$

$a := 0.508\ m$ — Torsie-buiging constante

$x := \frac{L}{2}$ — Locatie maximaal optredende torsie

$\frac{L}{a} = 3.94$ — Torsie gevoeligheid

$$fact := \left(1 + \cosh\left(\frac{L}{a}\right)\right) \cdot \frac{\left(\cosh\left(\frac{x}{a}\right) - 1\right)}{\sinh\left(\frac{L}{a}\right)} + \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot \frac{x}{a} - \sinh\left(\frac{x}{a}\right) = 0.23$$

Torsie factor

$$\phi_{randbalk} := \frac{fact \cdot T_{Ed} \cdot a}{G \cdot I_{T;PFC}} = 0.007$$

Optredende hoekverdraaiing randbalk

$u_{randbalk;torderen} := \phi_{randbalk} \cdot h = 6.92\ mm$ — Optredende horizontale verplaatsing door hoekverdraaiing randbalk

$$u_{leuning} := \frac{q \cdot hoh_{spijl} \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I_{spijl}} = 4.96\ mm$$

Optredende horizontale verplaatsing persrooster

$u_{tot} := u_{randbalk;torderen} + u_{leuning} = 11.88\ mm$ — Totaal optredende horziontale verplaatsing leuning

$u.c._{uh;leuning} := \frac{u_{tot}}{u_{h;max}} = 0.59$ — Unity check horizontale verplaatsing

## Controle spijl buigend moment

$M_{spijl} := \gamma_Q \cdot q \cdot h \cdot hoh_{spijl} = \left(60.00 \cdot 10^{-3}\right)\ kN \cdot m$ — Optredend moment spijl

$\sigma_{spijl} := \frac{M_{spijl}}{W_{spijl}} = 75.00\ MPa$ — Optredende spanning spijl

$u.c._{spijl} := \frac{\sigma_{spijl}}{f_u} = 0.15$ — Unity check spijl buigspanning

## Controle randbalk torsie

$\phi''_{randbalk} := \frac{fact \cdot T_{Ed}}{G \cdot I_{T;PFC} \cdot a} = 0.027\ \frac{1}{m^2}$ — Optredend moment spijl

$M_{w;Ed;randbalk} := \frac{E \cdot I_{w;PFC} \cdot \phi''_{randbalk}}{\left(h_{PFC} - t_{f;PFC}\right)} = 0.59\ kN \cdot m$ — Optredende verbuigingsmoment

$W_{f;pl} := \frac{1}{4} \cdot t_{f;PFC} \cdot b_{PFC}^2$ — Doorsnede verbuigings weerstand

$M_{w;Rd;randbalk} := W_{f;pl} \cdot f_y = 8.27\ kN \cdot m$ — Verbuigings weerstand

$u.c._{T;randbalk} := \frac{M_{w;Ed;randbalk}}{M_{w;Rd;randbalk}} = 0.07$ — Unity check randbalk op torsie

## Controle randbalk moment

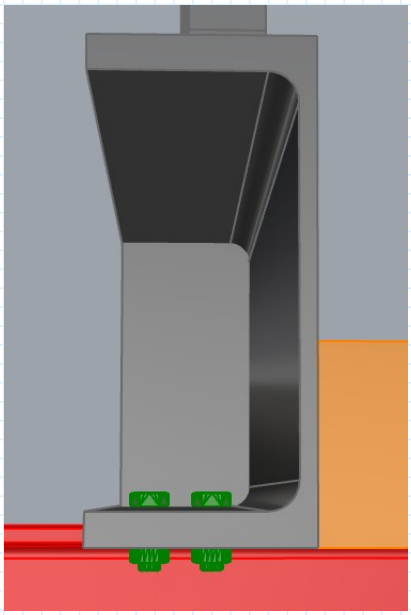
$M_{Ed;randbalk} := \frac{1}{8} \cdot \gamma_Q \cdot q \cdot L^2 = 0.60\ kN \cdot m$ Optredend moment

$\sigma_{M;randbalk} := \frac{M_{Ed;randbalk}}{W_{PFC}} = 2.38\ MPa$ Optredende buigingsspanning

$u.c._{\sigma M;randbalk} := \frac{\sigma_{M;randbalk}}{f_y} = 0.01$ unity check randbalk op buiging

## Controle verbinding randbalk met dwarsdrager

### Schets verbinding randbalk met dwarsdrager



$d_{bout} := 14\ mm$ Bout diameter

$d_0 := 16\ mm$ Boutgat diameter

$d_s := 11.8\ mm$ Boutschacht diameter

$d_m := 24.25\ mm$ Boutkop/ ring diameter

$A_s := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_s^2 = 1.09\ cm^2$ Boutschacht doorsnede oppervlakte

$A := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_{bout}^2 = 1.54\ cm^2$ Nominale doorsnede oppervlakte

$n_b := 4$ Aantal bouten

### Minimale randafstand bout

$e_1 := 1.2 \cdot d_0 = 19.20\ mm$

$e_2 := 1.2 \cdot d_0 = 19.20\ mm$

$p_1 := 2.2 \cdot d_0 = 35.20\ mm$

### Materiaal eigenschappen

$f_{yb} := 640\ MPa$ $f_{ub} := 800\ MPa$

$f_y = 355.00\ MPa$ $f_u = 510.00\ MPa$

**Boutkracht factoren**

$k_1 := \frac{2.8 \cdot e_2}{d_0} - 1.7 = 1.66$

$k_2 := 0.9$

$\alpha_d := \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = 400.00 \cdot 10^{-3}$

$\alpha_b := min\left(\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0\right) = 400.00 \cdot 10^{-3}$

$\alpha_v := 0.6$

**Bepalingen ruimte op flens PFC**

$b_{benodigd} := e_1 + p_1 + \frac{d_m}{2} = 66.53\ mm$ Benodigde breedte in onderflens

$b_{max} := b_{PFC} - r_{1;PFC} - t_{w;PFC} = 71.00\ mm$ Maximale breedte in onderflens

$p_{1;max} := p_1 + b_{max} - b_{benodigd} = 39.68\ mm$ Maximale ruimte tussen bouten in onderflens

**Optredende krachten**

$M := \gamma_Q \cdot q \cdot L \cdot (h + h_{PFC}) = 2.88\ kN \cdot m$ Totale moment op verbinding

$V := \gamma_Q \cdot q \cdot L = 2.40\ kN$ Totale dwarskracht op verbinding

**Nominale bout weerstanden, voor enkele bout**

$F_{v;Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = 59.1\ kN$ Schuifweerstand bout

$F_{b;Rd} := \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d_{bout} \cdot t_{f;HEA}}{\gamma_{M2}} = 32.2\ kN$ Stuik weerstand bout

$F_{t;Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 63\ kN$ Trekkrachtweerstand bout

$B_{p;Rd} := \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_{f;HEA} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 158.5\ kN$ Ponsweerstand dwarsbalk

**Check bouten op dwarskracht**

$V_{Ed} := \frac{V}{4} = 0.60\ kN$ Schuifspanning per bout

$UC_V := \frac{V_{Ed}}{min\left(F_{b;Rd}, F_{v;Rd}\right)} = 0.02$ Unity check schuifspanning

**Check moment**

$N_{Ed} := \frac{M}{2 \cdot p_{1;max}} = 36.29\ kN$ Schuifspanning per bout

$UC_N := \frac{N_{Ed}}{min\left(F_{t;Rd}, B_{p;Rd}\right)} = 0.58$ Unity check normaalspanning

**Check bout gecombineerd**

$$u.c._{comb} := \frac{V_{Ed}}{F_{v;Rd}} + \frac{N_{Ed}}{1.4 \cdot F_{t;Rd}} = 0.42$$

Unity check bouten gecombineerde spanning

# Bijlage V

## VO Toetsing dekken

Bepaling VVK-sandwich dekken voor 2m overspanning (80mm dik) en 4m overspanning (100mm dik) VO Reefbrug

# Detailed analysis FRP deck bridge

**Structural**

Project: BJ7949 VO Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Version: 1.0
Date: 24/07/26
Subject: Dekopbouw hoofdoverspanning VO Reefbrug (80mm dik)

## Geometry

$L := 2 \cdot m$ — Span between main girders

$b_{dek} := 2.5 \cdot m$ — Unit width deck

$h_1 := 8 \cdot mm$ — Thickness upper flange

$h_3 := 8\ mm$ — Thickness lower flange

$h_2 := 80 \cdot mm - h_1 - h_3 = 64.00\ mm$ — Height of web

$t_w := 5\ mm$ — Thickness of web

$ctc_{web} := 200 \cdot mm$ — Center to center distance webs

$b_1 := b_{dek} = 2.50\ m$ — Width of upper flange

$b_2 := t_w \cdot \frac{b_{dek}}{ctc_{web}} = 62.50\ mm$ — Total thickness of webs

$b_3 := b_{dek} = 2.50\ m$ — Width of lower flange

## Materials

### Material and conversion factors

$\gamma_m := 1.35 \cdot 1.2 = 1.62$ — Material factor gamma m1 * gamma m2, Vacuum infusion Vx<0,10

$\eta_{c.ST.ULS} := 0.9 \cdot 0.9 = 0.81$ — conversion factor UGT (variable loading)

$\eta_{c.LT.ULS} := 0.9 \cdot 0.9 \cdot \frac{1}{1.26} = 0.64$ — conversion factor UGT (long term loading)

$\eta_{c.ST.SLS} := 1.0 \cdot 0.9 = 0.90$ — conversion factor SLS any GFRP (variable loading)

$\eta_{c.LT.SLS55} := 1 \cdot 0.9 \cdot 0.7 = 0.63$ — conversion factor GFRP 55 SLS (long term loading)

$\eta_{c.LT.SLSQI} := 1 \cdot 0.9 \cdot 0.4 = 0.36$ — conversion factor GFRP QI SLS (long term loading)

**Material properties**

$E_{g55.x} := 25.8 \cdot GPa$ E-modulus GFRP55 in x-direction

$E_{g55.y} := 15.8 \cdot GPa$ E-modulus GFRP55 in y-direction

$G_{g55} := 4.6 \cdot GPa$ G-modulus inplane GFRP55

$E_{QI} := 14.8 \cdot GPa$ E-modulus GFRP QI in de x- and y direction

$G_{QI} := 5 \cdot GPa$ G-modulus inplane GFRP QI

$E_{g625.x} := 33.93 \cdot GPa$ E-modulus GFRP625 in x-direction

$E_{g625.y} := 16.4 \cdot GPa$ E-modulus GFRP625 in y-direction

$G_{g625} := 5.1 \cdot GPa$ G-modulus inplane GFRP625

$\rho_{VVK} := 18.5 \cdot \frac{kN}{m^3}$ density GFRP (all types)

**Material structural elements**

$E_1 := E_{g625.x} = 33.93\ GPa$ $G_1 := G_{g55} = 4.60\ GPa$ Properties upper flange

$E_2 := E_{QI} = 14.80\ GPa$ $G_2 := G_{QI} = 5.00\ GPa$ Properties web

$E_3 := E_{g625.x} = 33.93\ GPa$ $G_3 := G_{g55} = 4.60\ GPa$ Properties lower flange

**Strength (variable loading)**

$\varepsilon_{max} := 1.2\%$ $\gamma_{12max} := 1.6\%$

$f_{y.fb55.1} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.x} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 154.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP55, x-direction

$f_{y.fb55.2} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.y} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 94.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP55, y-direction

$f_{xy55.fb} := \frac{\gamma_{12max} \cdot G_{g55} \cdot \eta_{c.ST.ULS}}{\gamma_m} = 36.80\ MPa$ Allowable design shear stress GFRP55, xy-direction

$f_{y.wQI.1} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{QI} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 88.80\ MPa$ Allowable design stress GFRPQI, x--direction

$f_{y.wQI.2} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{QI} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 88.80\ MPa$ Allowable design stress GFRPQI, y-direction

$f_{xyQI.w} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot \gamma_{12max} \cdot G_{QI}}{\gamma_m} = 40.00\ MPa$ Allowable design shear stress GFRPQI, xy-direction

$f_{y.fb625.1} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.x} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 154.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP625, x-direction

$f_{y.fb625.2} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.y} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 94.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP625, y-direction

$f_{xy625.fb} := \frac{\gamma_{12max} \cdot G_{g55} \cdot \eta_{c.ST.ULS}}{\gamma_m} = 36.80\ MPa$ Allowable design shear stress GFRP625, xy-direction

$f_{xzILSS} := \frac{20 \cdot MPa \cdot \eta_{c.ST.ULS}}{\gamma_m} = 10.00\ MPa$ Allowable design interlaminar shear stress GFRP xz- and yz-direction all GFRP types

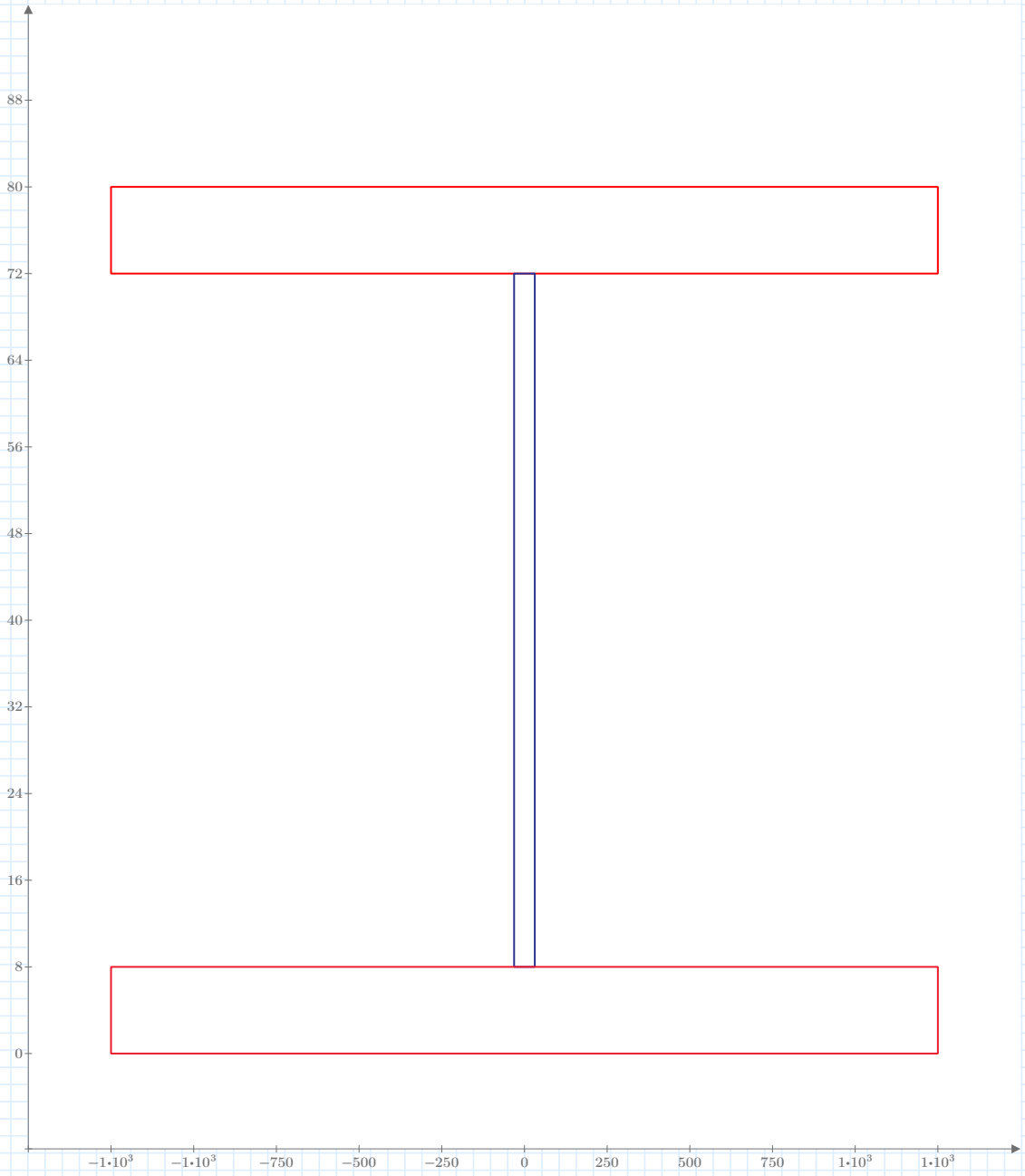
**Cross section properties**

$A_t = (44.00 \cdot 10^{-3})\ m^2$ Cross sectional area of deck

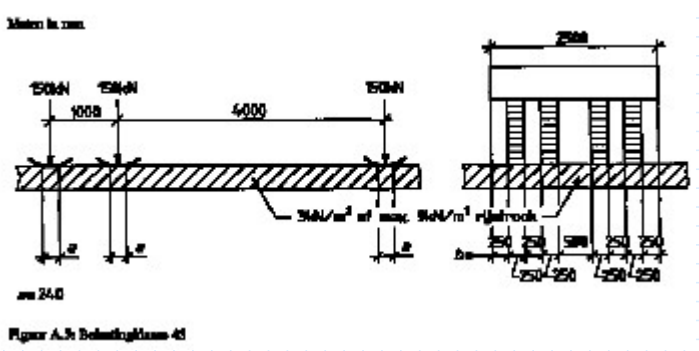
$EI = 1.8\ MN \cdot m^2$ Moment of inertia deck

$GA = 31\ MN$ Shear stiffness deck

**Representation of cross section- all webs combined**



## Loads SLS



**Traffic load**

$\alpha_q := 1.0$ Correction factor UDL

$\alpha_Q := \alpha_q = 1.00$ Correction factor axle loads

$p_{UDL.1} := 4.75 \cdot \frac{kN}{m^2}$ Traffic load (pedestrians, LM4)

is variable load

$q_Q := \alpha_q \cdot b_{dek} \cdot p_{UDL.1} = 11.88 \frac{kN}{m}$ Traffic load as line load

$F_Q := (7 \cdot kN \cdot 100)\% = 7.00\ kN$ Wheel load srvice vehicle

$t_{wearing_layer} := 6 \cdot mm$ $\rho_{wearing_layer} := 2500 \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot g$

$p_{wearing_layer} := t_{wearing_layer} \cdot \rho_{wearing_layer} = 147.10\ Pa$

$\rho_{railing} := 100 \frac{kg}{m}$

$p_{railing} := \frac{2 \cdot \rho_{railing}}{b_{dek}} \cdot g = 784.53\ Pa$

$q_{QP} := b_{dek} \cdot (p_{wearing_layer} + p_{railing}) = 2.33 \frac{kN}{m}$ *Asphalt*

## Deflection simply supported beam

$\eta := 1.0$

$q_Q = 11.88 \frac{kN}{m}$ $L = 2.00$ m $EI = 1.79$ MN·m$^2$ $GA = 31.04$ MN $q_{QP} := 4.797 \frac{kN}{m}$ $q_Q = 11.88 \frac{kN}{m}$

$w_q := \frac{5 \cdot q_Q \cdot L^4}{384 \cdot EI} + \frac{\eta \cdot q_Q \cdot L^2}{8 \cdot GA} = 1.58$ mm — deflection under variable load; max pedestrian LM4

$w_{QP} := \frac{5 \cdot q_{QP} \cdot L^4}{384 \cdot EI} + \frac{\eta \cdot q_{QP} \cdot L^2}{8 \cdot GA} = (636.72 \cdot 10^{-3})$ mm

$w_{FQ} := \frac{1}{48} \cdot \frac{F_Q \cdot L^3}{EI} + \frac{\eta \cdot 3 \cdot F_Q \cdot L}{4 \cdot GA} = (991.37 \cdot 10^{-3})$ mm — deflection under point load

$w_{tot} := w_{FQ} + w_{QP} = 1.63$ mm $w_{Shear} := \frac{\eta \cdot q_Q \cdot L^2}{8 \cdot GA} + \frac{\eta \cdot q_{QP} \cdot L^2}{8 \cdot GA} = (268.56 \cdot 10^{-3})$ mm — total deflection (conservative assumption)

$w_{bend} := w_{tot} - w_{Shear} = 1.36$ mm

$\delta := \frac{\eta_{c.ST.SLS} \cdot L}{250} = 7.20$ mm — Maximum allowable deflection

$UC_{deflection} := \frac{w_{tot}}{\delta} = 0.23$ is < 1, OK — Unity check deflection

## Loads ULS

$\gamma_{FCC3} := 1.0$ — Additional load factor CC3

$\gamma_G := 1.1 \cdot \gamma_{FCC3} = 1.10$ — Load factor Dead load ULS

$\gamma_Q := 1.2 \cdot \gamma_{FCC3} = 1.20$ — Load factor variable load ULS

### Dead load

$p_{EG} := A_t \cdot \frac{\rho_{VVK}}{b_{dek}} = (325.60 \cdot 10^{-3}) \frac{kN}{m^2}$ — Self weigth FRP

$p_{extra} := \frac{2.0 \cdot \frac{kN}{m}}{b_{dek}} = (800.00 \cdot 10^{-3}) \frac{1}{m^2} \cdot kN$ — additional loads, surfacing (average thickness 60mm) and parapets

$q_G := (p_{EG} + p_{extra}) \cdot b_{dek} = 2.81 \frac{kN}{m}$ — Line load dead load

### Traffic load

$\alpha_q := 1.0$ — Correction factor UDL

$\alpha_Q := \alpha_q = 1.00$ — Correction factor axle load

$p_{UDL.1} := 4.75 \cdot \frac{kN}{m^2}$

$F_{TS.1} := 7 \cdot kN = 7.00\ kN$ Traffic load axle 1

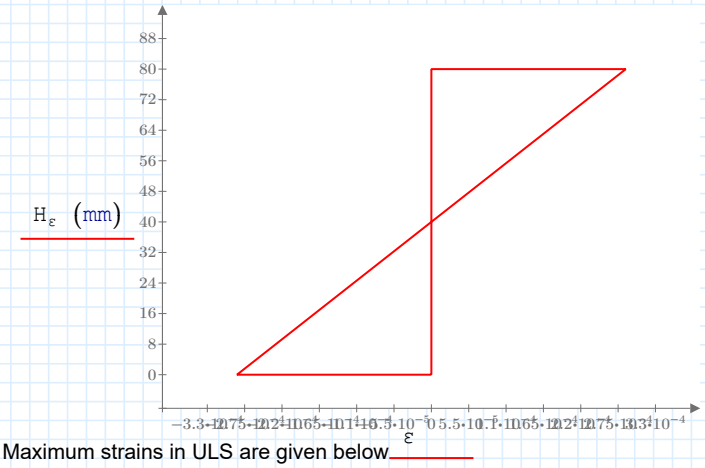
$q_Q := \alpha_q \cdot b_{dek} \cdot p_{UDL.1} + q_{QP} \cdot \frac{1}{0.7} = 18.73\ \frac{kN}{m}$ Line load variable load (LM4) ( per unit m width ( i.e transverse to spanning direction

$F_Q := \alpha_q \cdot F_{TS.1} = 7.00\ kN$ Point load (strength analysis)

$M_{rep} := \max\left(\frac{1}{8} \cdot (q_G + q_Q) \cdot L^2, \frac{1}{8} \cdot (q_G) \cdot L^2 + \frac{1}{4} F_Q \cdot L\right) = 10.77\ kN \cdot m$ Bending moment SLS

$M_{Ed} := \max\left(\frac{1}{8} \cdot (\gamma_G \cdot q_G + \gamma_Q \cdot q_Q) \cdot L^2, \frac{1}{8} \cdot (\gamma_G \cdot q_G) \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot F_Q \cdot L\right) = 12.78\ kN \cdot m$ Bending moment ULS

## Stresses and strains (global)

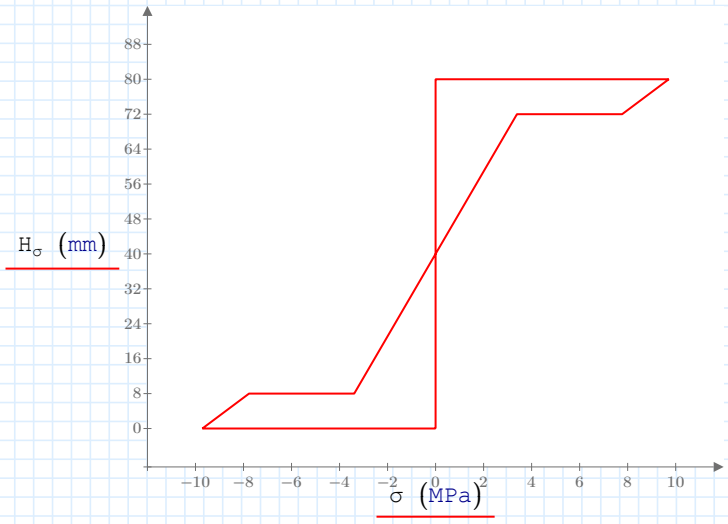



$\varepsilon_{1b} = (286.26 \cdot 10^{-3})\ \frac{1}{1000}$

$\varepsilon_{3o} = -286.26 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{1000}$

Maximum strains in ULS are given below

Maximum stresses in ULS are given below




$\sigma_{1b} = 9.71\ MPa$

$\sigma_{1o} = 7.77\ MPa$

$\sigma_{2b} = 3.39\ MPa$

$\sigma_{2o} = -3.39\ MPa$

$\sigma_{3b} = -7.77\ MPa$

$\sigma_{3o} = -9.71\ MPa$

$\sigma_{bgt.1} := \max(|\sigma_{1b}|, |\sigma_{1o}|) = 9.71\ MPa$ Maximum stress upper flange ULS

$\sigma_{bgt.2} := \max(|\sigma_{2b}|, |\sigma_{2o}|) = 3.39\ MPa$ Maximum stresses web ULS

$\sigma_{bgt.3} := \max(|\sigma_{3b}|, |\sigma_{3o}|) = 9.71\ MPa$ Maximum stress lower flange ULS

## Unity check strength

$$UC_{s.1} := \frac{\frac{M_{Ed}}{M_{rep}} \cdot \sigma_{bgt.1}}{f_{y.fb55.1}} = 74.47 \cdot 10^{-3}$$

Unity check strength upper flange

$$UC_{s.2} := \frac{\frac{M_{Ed}}{M_{rep}} \cdot \sigma_{bgt.2}}{f_{y.wQI.1}} = 45.30 \cdot 10^{-3}$$

Unity check strength web

$$UC_{s.3} := \frac{\frac{M_{Ed}}{M_{rep}} \cdot \sigma_{bgt.3}}{f_{y.fb55.1}} = 74.47 \cdot 10^{-3}$$

Unity check strength upper flange

$UC_{strength} := \max\left(UC_{s.1}, UC_{s.2}, UC_{s.3}\right) = 0.07$ is < 1, OK

Maximum Unity check strength

## Detailed analysis deck webs

The pointload of 7 kN with the dimensions of 100mm x 100mm applied on 1 panel

$b_{pointload} := 100 \cdot mm$ width wheel print

$l_{pointload} := 100 \cdot mm$ length wheel print

$F_Q = 7.00\ kN$ maximum wheel load

$\gamma_Q = 1.20$ load factor incl CC3

$t_w = 5.00\ mm$ web thickness

$h_2 = 64.00\ mm$ web height

$$n := \max\left(1, \frac{l_{pointload}}{ctc_{web}}\right) = 1.00$$

number of webs under wheel print:

The maximum occurring shear stress at the webs is:

$F_w := 7\ kN = 7.00\ kN$

$$\tau_{pointload} := \frac{\gamma_Q \cdot F_w}{n \cdot t_w \cdot h_2} = 26.25\ MPa$$

local shear load is FQ/2 ( 2 sides of wheel print take shear load)

$UC_{pointload;\tau} := \frac{\tau_{pointload}}{f_{xyQI.w}} = 0.66$ is < 1, OK (contribution of flanges excluded)

unity check shear stress

Flange under pointload in case ctc web > b pointload

$$\sigma_{pointload} := \frac{0.0114583083 \cdot m \cdot F_w \cdot \gamma_Q}{\frac{1}{6} \cdot l_{pointload} \cdot h_1^{\,2}} = 90.23\ MPa$$

Local bending moments in top flange

$$\tau_{ILLS;pointload} := \frac{F_w \cdot \gamma_Q}{(2 \cdot l_{pointload} + 2 \cdot b_{pointload}) \cdot h_1} = 2.63\ MPa$$ Interlaminar shear in top flange

$$UC_{pointload;\sigma} := \frac{\sigma_{pointload}}{f_{y.fb625.1}} = 0.58$$ unity check flanges on bending

$$UC_{pointload;ILLS} := \frac{\tau_{ILLS;pointload}}{f_{xzILSS}} = 0.26$$ unity check interlaminar shear

$$UC_{flange;pointload} := \max\left(UC_{pointload;\sigma}, UC_{pointload;ILLS}\right) = 0.58$$ is < 1, OK unity check flange on pointload

**Compression stress in the web**

The compression in the web at the supports is calculated

$$\sigma_{pload} := \frac{F_w}{n \cdot t_w \cdot \left(l_{pointload} + \frac{h_2}{2}\right)} = 10.6\ MPa$$ average compression stress in webs of top deck

$$UC_{pload} := \frac{\sigma_{pload}}{f_{y.wQI.1}} = 0.12$$ is < 1, OK unity check

**Stability at the main beam**

A first estimate is made for the stability of the webs under the compression load at the support.
The most critical location is at the higher end of the bridge.
Based on the outcome recommendations are made for the further detailing of the members under consideration (i.e web of the cross girder and main beam).

$E := E_{QI} = 14.80\ GPa$ stiffness of the web laminate

$h_2 = (64.00 \cdot 10^{-3})\ m$ height of the webs

$t_w = 5.00\ mm$ thickness of the webs

$\nu := 0.3$ Poisson ratio

$$D_{11} := \frac{E \cdot t_w^{\ 3}}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$\gamma_{m.stab} := 1.15 \cdot 1.4 = 1.61$ CUR96 ; 2017 local stability, Vx<0,10

$$\gamma_{stab} := \frac{\gamma_{m.stab}}{\eta_{c.ST.ULS}} = 1.99$$

assuming conservatively the web is simply supported by the flanges:

$$N_{Rdw} := \frac{1}{\gamma_{stab}} \cdot \frac{\pi^2}{h_2^{\ 2}} \cdot (D_{11}) = 205.38\ \frac{1}{m} \cdot kN$$ Design capacity compression load - stability

$$\sigma_{1stab.Rd} := \frac{N_{Rdw}}{t_w} = 41.08\ MPa$$ Design allowable stress compression load - stability

$\sigma_{1.Ed} := \sigma_{pload} = 10.6\ MPa$ Maximum compressive stress

As a first estimate, to deal with imperfections a reserve factor is applied: $r_{fstab} := 0.5$

$$UC_{1stability} := \frac{\sigma_{1.Ed}}{r_{fstab} \cdot \sigma_{1stab.Rd}} = 0.52$$ is < 1, OK

**Summary of results**

$UC_{deflection} = 0.23$ Unity check deflection

$UC_{strength} = 0.07$ Unity check global strength

$UC_{pointload;\tau} = 0.66$ Unity check local shear strength

$UC_{flange;pointload} = 0.58$ Unity check local flange strength

$UC_{pload} = 0.12$ Unity check local compression strength

$UC_{lstability} = 0.52$ Unity check local stability

**Mass of the deck**

$\rho_{VVK} := 1900 \cdot \frac{kg}{m^3}$

$\rho_{foam} := 35 \cdot \frac{kg}{m^3}$

$r_f := 1.2$

$L_{span} := 18 \cdot m \quad b_{tot} := 2.5 \cdot m \quad t_{rand} := h_1 = (8.00 \cdot 10^{-3})\ m$

$A_{rand} := 2 \cdot L_{span} \cdot (h_2 + 2 \cdot h_1) \cdot t_{rand} + 2 \cdot b_{tot} \cdot (h_2 + 2 \cdot h_1) \cdot t_{rand} = 26.24\ L$

$M_{deck} := \frac{(r_f \cdot A_t \cdot \rho_{VVK} + ((b_{dek} - b_2) \cdot h_2 \cdot \rho_{foam}))}{b_{dek}} + \frac{A_{rand} \cdot \rho_{VVK}}{L_{span} \cdot b_{tot}} = 43.42 \frac{kg}{m^2}$

$\frac{A_{rand} \cdot \rho_{VVK}}{L_{span} \cdot b_{tot}} = 1.11 \frac{kg}{m^2}$

$EUR := 1$

$EUR_{FRP} := 12 \cdot \frac{EUR}{kg} = 12.00 \frac{1}{kg}$

$EUR_{deck} := \frac{(r_f \cdot A_t \cdot \rho_{VVK} + ((b_{dek} - b_2) \cdot h_2 \cdot \rho_{foam})) \cdot EUR_{FRP}}{b_{dek}} = 507.74 \frac{1}{m^2}$

# Detailed analysis FRP deck bridge

**Structural**

Project: BJ7949 VO Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Version: 1.0
Date: 24/07/26
Subject: Dekopbouw aanbruggen VO Reefbrug (100mm dik)

## Geometry

$L := 4 \cdot m$ — Span between main girders

$b_{dek} := 2.5 \cdot m$ — Unit width deck

$h_1 := 10 \cdot mm$ — Thickness upper flange

$h_3 := 10\ mm$ — Thickness lower flange

$h_2 := 100 \cdot mm - h_1 - h_3 = 80.00\ mm$ — Height of web

$t_w := 5\ mm$ — Thickness of web

$ctc_{web} := 200 \cdot mm$ — Center to center distance webs

$b_1 := b_{dek} = 2.50\ m$ — Width of upper flange

$b_2 := t_w \cdot \frac{b_{dek}}{ctc_{web}} = 62.50\ mm$ — Total thickness of webs

$b_3 := b_{dek} = 2.50\ m$ — Width of lower flange

## Materials

### Material and conversion factors

$\gamma_m := 1.35 \cdot 1.2 = 1.62$ — Material factor gamma m1 * gamma m2, Vacuum infusion Vx<0,10

$\eta_{c.ST.ULS} := 0.9 \cdot 0.9 = 0.81$ — conversion factor UGT (variable loading)

$\eta_{c.LT.ULS} := 0.9 \cdot 0.9 \cdot \frac{1}{1.26} = 0.64$ — conversion factor UGT (long term loading)

$\eta_{c.ST.SLS} := 1.0 \cdot 0.9 = 0.90$ — conversion factor SLS any GFRP (variable loading)

$\eta_{c.LT.SLS55} := 1 \cdot 0.9 \cdot 0.7 = 0.63$ — conversion factor GFRP 55 SLS (long term loading)

$\eta_{c.LT.SLSQI} := 1 \cdot 0.9 \cdot 0.4 = 0.36$ — conversion factor GFRP QI SLS (long term loading)

**Material properties**

$E_{g55.x} := 25.8 \cdot GPa$ E-modulus GFRP55 in x-direction

$E_{g55.y} := 15.8 \cdot GPa$ E-modulus GFRP55 in y-direction

$G_{g55} := 4.6 \cdot GPa$ G-modulus inplane GFRP55

$E_{QI} := 14.8 \cdot GPa$ E-modulus GFRP QI in de x- and y direction

$G_{QI} := 5 \cdot GPa$ G-modulus inplane GFRP QI

$E_{g625.x} := 33.93 \cdot GPa$ E-modulus GFRP625 in x-direction

$E_{g625.y} := 16.4 \cdot GPa$ E-modulus GFRP625 in y-direction

$G_{g625} := 5.1 \cdot GPa$ G-modulus inplane GFRP625

$\rho_{VVK} := 18.5 \cdot \frac{kN}{m^3}$ density GFRP (all types)

**Material structural elements**

$E_1 := E_{g625.x} = 33.93\ GPa$ $G_1 := G_{g55} = 4.60\ GPa$ Properties upper flange

$E_2 := E_{QI} = 14.80\ GPa$ $G_2 := G_{QI} = 5.00\ GPa$ Properties web

$E_3 := E_{g625.x} = 33.93\ GPa$ $G_3 := G_{g55} = 4.60\ GPa$ Properties lower flange

**Strength (variable loading)**

$\varepsilon_{max} := 1.2\%$ $\gamma_{12max} := 1.6\%$

$f_{y.fb55.1} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.x} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 154.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP55, x-direction

$f_{y.fb55.2} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.y} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 94.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP55, y-direction

$f_{xy55.fb} := \frac{\gamma_{12max} \cdot G_{g55} \cdot \eta_{c.ST.ULS}}{\gamma_m} = 36.80\ MPa$ Allowable design shear stress GFRP55, xy-direction

$f_{y.wQI.1} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{QI} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 88.80\ MPa$ Allowable design stress GFRPQI, x--direction

$f_{y.wQI.2} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{QI} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 88.80\ MPa$ Allowable design stress GFRPQI, y-direction

$f_{xyQI.w} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot \gamma_{12max} \cdot G_{QI}}{\gamma_m} = 40.00\ MPa$ Allowable design shear stress GFRPQI, xy-direction

$f_{y.fb625.1} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.x} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 154.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP625, x-direction

$f_{y.fb625.2} := \frac{\eta_{c.ST.ULS} \cdot E_{g55.y} \cdot \varepsilon_{max}}{\gamma_m} = 94.80\ MPa$ Allowable design stress GFRP625, y-direction

$f_{xy625.fb} := \frac{\gamma_{12max} \cdot G_{g55} \cdot \eta_{c.ST.ULS}}{\gamma_m} = 36.80\ MPa$ Allowable design shear stress GFRP625, xy-direction

$f_{xzILSS} := \frac{20 \cdot MPa \cdot \eta_{c.ST.ULS}}{\gamma_m} = 10.00\ MPa$ Allowable design interlaminar shear stress GFRP xz- and yz-direction all GFRP types

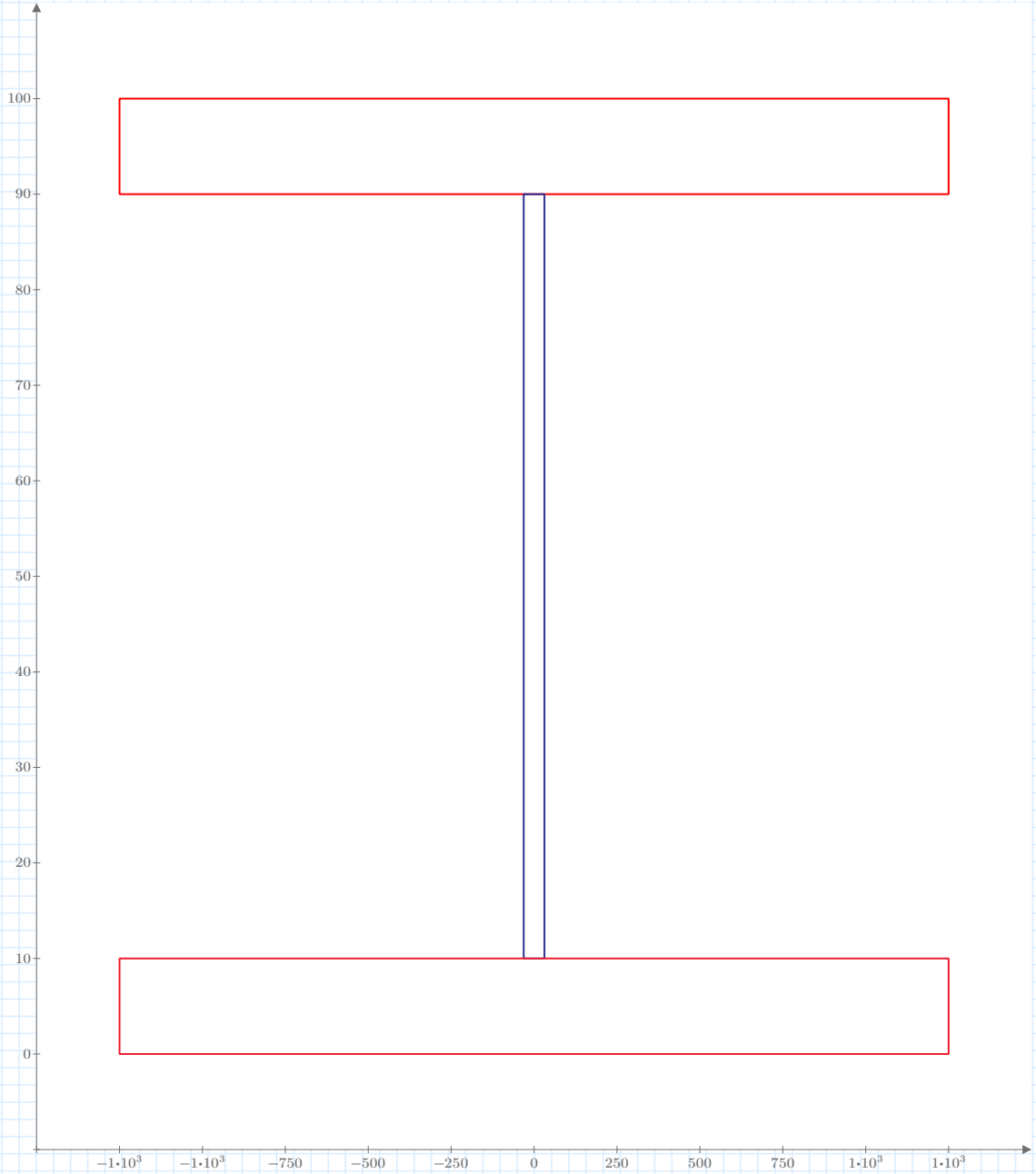
**Cross section properties**

$A_t = (55.00 \cdot 10^{-3})\ m^2$ Cross sectional area of deck

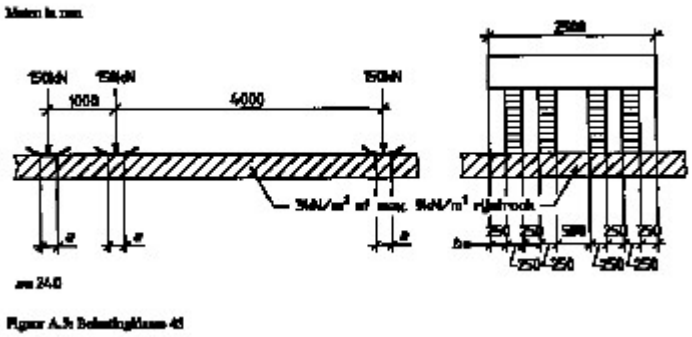
$EI = 3.5\ MN \cdot m^2$ Moment of inertia deck

$GA = 38.8\ MN$ Shear stiffness deck

**Representation of cross section- all webs combined**



## Loads SLS



**Traffic load**

$\alpha_q := 1.0$ Correction factor UDL

$\alpha_Q := \alpha_q = 1.00$ Correction factor axle loads

$p_{UDL.1} := 4.75 \cdot \frac{kN}{m^2}$ Traffic load (pedestrians, LM4)

is variable load

$q_Q := \alpha_q \cdot b_{dek} \cdot p_{UDL.1} = 11.88 \frac{kN}{m}$ Traffic load as line load

$F_Q := (7 \cdot kN \cdot 100)\% = 7.00\ kN$ Wheel load srvice vehicle

$t_{wearing_layer} := 6 \cdot mm$ $\rho_{wearing_layer} := 2500 \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot g$

$p_{wearing_layer} := t_{wearing_layer} \cdot \rho_{wearing_layer} = 147.10\ Pa$

$\rho_{railing} := 100 \frac{kg}{m}$

$p_{railing} := \frac{2 \cdot \rho_{railing}}{b_{dek}} \cdot g = 784.53\ Pa$

$q_{QP} := b_{dek} \cdot (p_{wearing_layer} + p_{railing}) = 2.33 \frac{kN}{m}$ *Asphalt*

## Deflection simply supported beam

$\eta := 1.0$

$q_Q = 11.88 \frac{kN}{m}$ $L = 4.00\ m$ $EI = 3.49\ MN \cdot m^2$ $GA = 38.80\ MN$ $q_{QP} := 4.797 \frac{kN}{m}$ $q_Q = 11.88 \frac{kN}{m}$

$w_q := \frac{5 \cdot q_Q \cdot L^4}{384 \cdot EI} + \frac{\eta \cdot q_Q \cdot L^2}{8 \cdot GA} = 11.96\ mm$ deflection under variable load; max pedestrian LM4

$w_{QP} := \frac{5 \cdot q_{QP} \cdot L^4}{384 \cdot EI} + \frac{\eta \cdot q_{QP} \cdot L^2}{8 \cdot GA} = 4.83\ mm$

$w_{FQ} := \frac{1}{48} \cdot \frac{F_Q \cdot L^3}{EI} + \frac{\eta \cdot 3 \cdot F_Q \cdot L}{4 \cdot GA} = 3.22\ mm$ deflection under point load

$w_{tot} := w_{FQ} + w_{QP} = 8.05\ mm$ $w_{Shear} := \frac{\eta \cdot q_Q \cdot L^2}{8 \cdot GA} + \frac{\eta \cdot q_{QP} \cdot L^2}{8 \cdot GA} = (859.41 \cdot 10^{-3})\ mm$ Total deflection (conservative assumption)

$w_{bend} := w_{tot} - w_{Shear} = 7.19\ mm$

$\delta := \frac{\eta_{c.ST.SLS} \cdot L}{250} = 14.40\ mm$ Maximum allowable deflection

$UC_{deflection} := \frac{w_{tot}}{\delta} = 0.56$ is < 1, OK Unity check deflection

## Loads ULS

$\gamma_{FCC3} := 1.0$ Additional load factor CC3

$\gamma_G := 1.1 \cdot \gamma_{FCC3} = 1.10$ Load factor Dead load ULS

$\gamma_Q := 1.2 \cdot \gamma_{FCC3} = 1.20$ Load factor variable load ULS

### Dead load

$p_{EG} := A_t \cdot \frac{\rho_{VVK}}{b_{dek}} = (407.00 \cdot 10^{-3}) \frac{kN}{m^2}$ Self weigth FRP

$p_{extra} := \frac{2.0 \cdot \frac{kN}{m}}{b_{dek}} = (800.00 \cdot 10^{-3}) \frac{1}{m^2} \cdot kN$ additional loads, surfacing (average thickness 60mm) and parapets

$q_G := (p_{EG} + p_{extra}) \cdot b_{dek} = 3.02 \frac{kN}{m}$ Line load dead load

### Traffic load

$\alpha_q := 1.0$ Correction factor UDL

$\alpha_Q := \alpha_q = 1.00$ Correction factor axle load

$p_{UDL.1} := 4.75 \cdot \frac{kN}{m^2}$

$F_{TS.1} := 7 \cdot kN = 7.00\ kN$ Traffic load axle 1

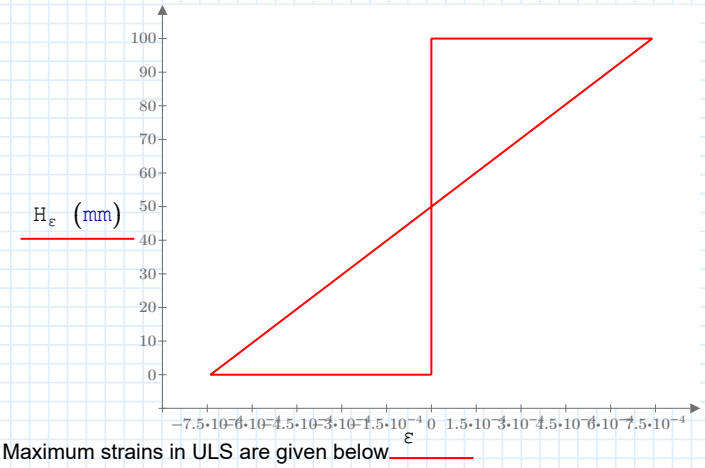
$q_Q := \alpha_q \cdot b_{dek} \cdot p_{UDL.1} + q_{QP} \cdot \frac{1}{0.7} = 18.73\ \frac{kN}{m}$ Line load variable load (LM4) ( per unit m width ( i.e transverse to spanning direction

$F_Q := \alpha_q \cdot F_{TS.1} = 7.00\ kN$ Point load (strength analysis)

$M_{rep} := \max\left(\frac{1}{8} \cdot (q_G + q_Q) \cdot L^2, \frac{1}{8} \cdot (q_G) \cdot L^2 + \frac{1}{4} F_Q \cdot L\right) = 43.49\ kN \cdot m$ Bending moment SLS

$M_{Ed} := \max\left(\frac{1}{8} \cdot (\gamma_G \cdot q_G + \gamma_Q \cdot q_Q) \cdot L^2, \frac{1}{8} \cdot (\gamma_G \cdot q_G) \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot F_Q \cdot L\right) = 51.59\ kN \cdot m$ Bending moment ULS

## Stresses and strains (global)

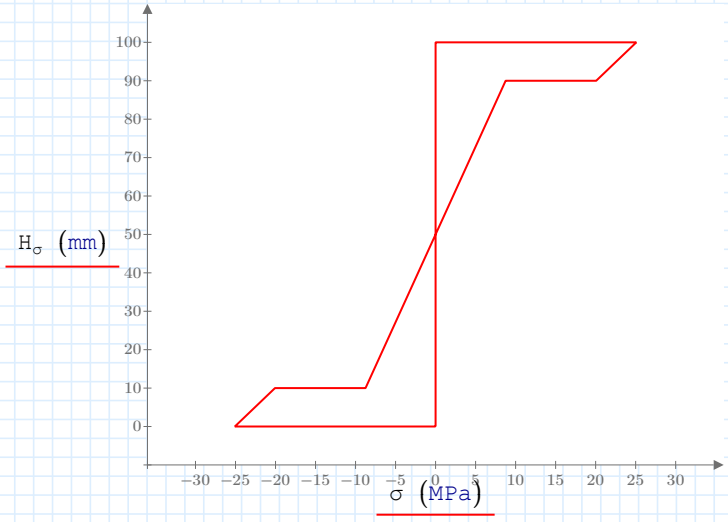



$\varepsilon_{1b} = (739.25 \cdot 10^{-3})\ \frac{1}{1000}$

$\varepsilon_{3o} = -739.25 \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{1000}$

Maximum strains in ULS are given below

Maximum stresses in ULS are given below




$\sigma_{1b} = 25.08\ MPa$

$\sigma_{1o} = 20.07\ MPa$

$\sigma_{2b} = 8.75\ MPa$

$\sigma_{2o} = -8.75\ MPa$

$\sigma_{3b} = -20.07\ MPa$

$\sigma_{3o} = -25.08\ MPa$

$\sigma_{bgt.1} := \max(|\sigma_{1b}|, |\sigma_{1o}|) = 25.08\ MPa$ Maximum stress upper flange ULS

$\sigma_{bgt.2} := \max(|\sigma_{2b}|, |\sigma_{2o}|) = 8.75\ MPa$ Maximum stresses web ULS

$\sigma_{bgt.3} := \max(|\sigma_{3b}|, |\sigma_{3o}|) = 25.08\ MPa$ Maximum stress lower flange ULS

## Unity check strength

$$UC_{s.1} := \frac{\frac{M_{Ed}}{M_{rep}} \cdot \sigma_{bgt.1}}{f_{y.fb55.1}} = 192.19 \cdot 10^{-3}$$

Unity check strength upper flange

$$UC_{s.2} := \frac{\frac{M_{Ed}}{M_{rep}} \cdot \sigma_{bgt.2}}{f_{y.wQI.1}} = 116.91 \cdot 10^{-3}$$

Unity check strength web

$$UC_{s.3} := \frac{\frac{M_{Ed}}{M_{rep}} \cdot \sigma_{bgt.3}}{f_{y.fb55.1}} = 192.19 \cdot 10^{-3}$$

Unity check strength upper flange

$UC_{strength} := \max\left(UC_{s.1}, UC_{s.2}, UC_{s.3}\right) = 0.19$ is < 1, OK

Maximum Unity check strength

## Detailed analysis deck webs

The pointload of 7 kN with the dimensions of 100mm x 100mm applied on 1 panel

$b_{pointload} := 100 \cdot mm$ width wheel print

$l_{pointload} := 100 \cdot mm$ length wheel print

$F_Q = 7.00\ kN$ maximum wheel load

$\gamma_Q = 1.20$ load factor incl CC3

$t_w = 5.00\ mm$ web thickness

$h_2 = 80.00\ mm$ web height

$$n := \max\left(1, \frac{l_{pointload}}{ctc_{web}}\right) = 1.00$$

number of webs under wheel print:

The maximum occurring shear stress at the webs is:

$F_w := 7\ kN = 7.00\ kN$

$$\tau_{pointload} := \frac{\gamma_Q \cdot F_w}{n \cdot t_w \cdot h_2} = 21.00\ MPa$$

local shear load is FQ/2 ( 2 sides of wheel print take shear load)

$UC_{pointload;\tau} := \frac{\tau_{pointload}}{f_{xyQI.w}} = 0.53$ is < 1, OK (contribution of flanges excluded)

unity check shear stress

Flange under pointload in case ctc web > b pointload

$$\sigma_{pointload} := \frac{0.0114583083 \cdot m \cdot F_w \cdot \gamma_Q}{\frac{1}{6} \cdot l_{pointload} \cdot h_1^{\,2}} = 57.75\ MPa$$

Local bending moments in top flange

$$\tau_{ILLS;pointload} := \frac{F_w \cdot \gamma_Q}{(2 \cdot l_{pointload} + 2 \cdot b_{pointload}) \cdot h_1} = 2.10\ MPa$$ Interlaminar shear in top flange

$$UC_{pointload;\sigma} := \frac{\sigma_{pointload}}{f_{y.fb625.1}} = 0.37$$ unity check flanges on bending

$$UC_{pointload;ILLS} := \frac{\tau_{ILLS;pointload}}{f_{xzILSS}} = 0.21$$ unity check interlaminar shear

$$UC_{flange;pointload} := \max\left(UC_{pointload;\sigma}, UC_{pointload;ILLS}\right) = 0.37$$ is < 1, OK unity check flange on pointload

**Compression stress in the web**

The compression in the web at the supports is calculated

$$\sigma_{pload} := \frac{F_w}{n \cdot t_w \cdot \left(l_{pointload} + \frac{h_2}{2}\right)} = 10\ MPa$$ average compression stress in webs of top deck

$$UC_{pload} := \frac{\sigma_{pload}}{f_{y.wQI.1}} = 0.11$$ is < 1, OK unity check

**Stability at the main beam**

A first estimate is made for the stability of the webs under the compression load at the support.
The most critical location is at the higher end of the bridge.
Based on the outcome recommendations are made for the further detailing of the members under consideration (i.e web of the cross girder and main beam).

$E := E_{QI} = 14.80\ GPa$ stiffness of the web laminate

$h_2 = (80.00 \cdot 10^{-3})\ m$ height of the webs

$t_w = 5.00\ mm$ thickness of the webs

$\nu := 0.3$ Poisson ratio

$$D_{11} := \frac{E \cdot t_w^{\ 3}}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$\gamma_{m.stab} := 1.15 \cdot 1.4 = 1.61$ CUR96 ; 2017 local stability, Vx<0,10

$$\gamma_{stab} := \frac{\gamma_{m.stab}}{\eta_{c.ST.ULS}} = 1.99$$

assuming conservatively the web is simply supported by the flanges:

$$N_{Rdw} := \frac{1}{\gamma_{stab}} \cdot \frac{\pi^2}{h_2^{\ 2}} \cdot (D_{11}) = 131.44\ \frac{1}{m} \cdot kN$$ Design capacity compression load - stability

$$\sigma_{1stab.Rd} := \frac{N_{Rdw}}{t_w} = 26.29\ MPa$$ Design allowable stress compression load - stability

$\sigma_{1.Ed} := \sigma_{pload} = 10\ MPa$ Maximum compressive stress

As a first estimate, to deal with imperfections a reserve factor is applied: $r_{fstab} := 0.5$

$$UC_{1stability} := \frac{\sigma_{1.Ed}}{r_{fstab} \cdot \sigma_{1stab.Rd}} = 0.76$$ is < 1, OK

**Summary of results**

$UC_{deflection} = 0.56$ Unity check deflection

$UC_{strength} = 0.19$ Unity check global strength

$UC_{pointload;\tau} = 0.53$ Unity check local shear strength

$UC_{flange;pointload} = 0.37$ Unity check local flange strength

$UC_{pload} = 0.11$ Unity check local compression strength

$UC_{lstability} = 0.76$ Unity check local stability

**Mass of the deck**

$\rho_{VVK} := 1900 \cdot \frac{kg}{m^3}$

$\rho_{foam} := 35 \cdot \frac{kg}{m^3}$

$r_f := 1.2$

$L_{span} := 18 \cdot m \quad b_{tot} := 2.5 \cdot m \qquad t_{rand} := h_1 = (10.00 \cdot 10^{-3})\ m$

$A_{rand} := 2 \cdot L_{span} \cdot (h_2 + 2 \cdot h_1) \cdot t_{rand} + 2 \cdot b_{tot} \cdot (h_2 + 2 \cdot h_1) \cdot t_{rand} = 41.00\ L$

$M_{deck} := \frac{(r_f \cdot A_t \cdot \rho_{VVK} + ((b_{dek} - b_2) \cdot h_2 \cdot \rho_{foam}))}{b_{dek}} + \frac{A_{rand} \cdot \rho_{VVK}}{L_{span} \cdot b_{tot}} = 54.62 \frac{kg}{m^2}$

$\frac{A_{rand} \cdot \rho_{VVK}}{L_{span} \cdot b_{tot}} = 1.73 \frac{kg}{m^2}$

$EUR := 1$

$EUR_{FRP} := 12 \cdot \frac{EUR}{kg} = 12.00 \frac{1}{kg}$

$EUR_{deck} := \frac{(r_f \cdot A_t \cdot \rho_{VVK} + ((b_{dek} - b_2) \cdot h_2 \cdot \rho_{foam})) \cdot EUR_{FRP}}{b_{dek}} = 634.68 \frac{1}{m^2}$

## Bijlage VI

# VO Toetsing dwarsdragers

Bepaling voor dwarsdragers voor VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Toetsing dwarsdragers

**Structural**

Project: BJ7949 VO Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Version: 1.0
Date: 24/07/26
Subject: Bepalingen dwarsdrager VO Reefbrug

## Geometrie

$hoh := 2\ m$ — Hart op hart afstand dwarsdragers

$b_{dek} := 2.5\ m$ — Breedte dek

$l_{dd} := 4\ m$ — Lengte dwarsdragers

$b_{rand} := \frac{l_{dd} - b_{dek}}{2} = 0.75\ m$ — Breedte rand dek-hoofdliggers

$f_y := 355\ MPa$ $\quad f_u := 510\ MPa$ — *Staalkwaliteit*

## Belasting

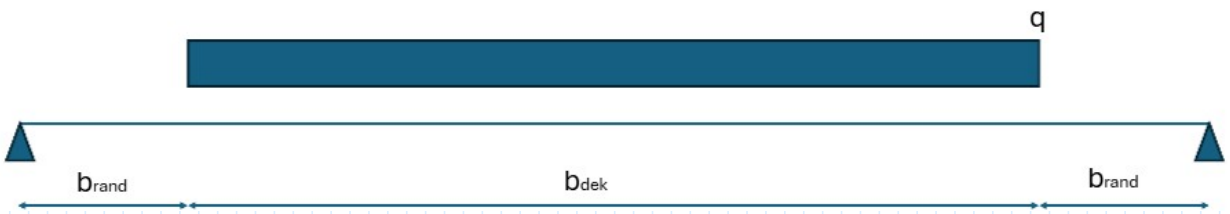
$G := 100\ \frac{kg}{m^2} \cdot g$ — Eigen gewicht dek

$q := 4.75\ \frac{kN}{m^2}$ — Gelijkmatig verdeelde belasting

$F_Q := 7\ kN$ — Puntlast

$\gamma_G := 1.1$ $\quad \gamma_Q := 1.2$ — Belastingsfactoren

## Schematisatie




## Interne krachten

$V_q := \frac{1}{2} \cdot G \cdot l_{dd} \cdot hoh \cdot \gamma_Q + \frac{1}{2} \cdot q \cdot hoh \cdot b_{dek} \cdot \gamma_Q = 19\ kN$ — Dwarskracht door gelijkmatig verdeelde belasting

$V_F := \frac{1}{2} \cdot G \cdot l_{dd} \cdot hoh \cdot \gamma_Q + F_Q \cdot \gamma_Q = 13.11\ kN$ — Dwarskracht door puntlast

$M_q := \frac{1}{8} \cdot G \cdot l_{dd}^2 \cdot hoh \cdot \gamma_G + \frac{1}{8} \cdot q \cdot hoh \cdot l_{dd}^2 \cdot \gamma_Q = 27.11\ kN \cdot m$ — Buigend moment door gelijkmatig verdeelde belasting

$M_F := \frac{1}{8} \cdot G \cdot l_{dd}^2 \cdot hoh \cdot \gamma_G + \frac{1}{4} \cdot F_Q \cdot l_{dd} \cdot \gamma_Q = 12.71\ kN \cdot m$ — Buigend moment door puntlast

## Doorsnede eigenschappen HEA 140

$A_{v;dd} := 19.95\ cm^2$ Afschuif oppervlakte

$W_{y;dd} := 155.4\ cm^3$ Buigweerstand

## Toetsing

$$u.c._V := \frac{V_q}{A_{v;dd} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}} = 0.05$$ Unity check op dwarskracht

$$u.c._M := \frac{M_q}{W_{y;dd} \cdot f_y} = 0.49$$ Unity check op buigend moment

## Bijlage VII

# VO Toetsing verbinding dwarsdrager met turbineligger

Bepalingen verbinding dwarsdrager met turbineligger, kritieke doorsnede, VO Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

# Verbinding dwarsdrager met windturbineblad

**Structural**

Project: BJ7949 VO Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Version: 1.0
Date: 27/07/26
Subject: Bepalingen verbinding dwarsdrager met turbineblad

## Check bouten in VVK turbineligger

### Vlaktedruk

$d_b := 24\ mm$ — diameter bout

$d_{hole} := 1.1 \cdot d_b$ — aangehouden gatdiameter

$f_{y;c;Rd} := 8.651\ GPa \cdot 0.6\% = 51.9\ MPa$ — rekenwaarde druk in y-richting rand

$k_{m1} := 2$ — spanningsconcentratie factoren, wel rotatie van de bout

$k_{m2} := 1.0$

$k_m := k_{m1} \cdot k_{m2}$ — totale spanningsconcentratie factoren

$t_{lam} := 18\ mm$ — minimale dikte laminaat rand

$\frac{d_b}{t_{lam}} = 1.33$ — verhouding boutdiameter-laminaat

$P := 23\ kN = 23.00\ kN$ — Totale dwarskracht bij verbinding

$n_{row} := 2$ $\quad n_{col} := 2$ — Aantal toegepaste bouten

$Mat_{con} :=$ Steel

$C_{ri} = 0.60$ — Verdelingsparameter

$$\sigma_b := \frac{k_m \cdot \left(\frac{d_{hole}}{d_b}\right)^2 \cdot \frac{P \cdot C_{ri}}{n_{col}}}{(d_b \cdot t_{lam})} = 38.65\ MPa$$ — optredende vlaktedruk per bout

$UC_{bearing} := \frac{\sigma_b}{f_{y;c;Rd}} = 744.67 \cdot 10^{-3}$

### randafstanden

$e_1 := 4 \cdot d_b = 96.00\ mm$ $\quad e_2 := 2 \cdot d_b = 48.00\ mm$ — minimum randafstanden

$p_1 := 4 \cdot d_b = 96.00\ mm$ $\quad p_2 := 4 \cdot d_b = 96.00\ mm$

$b_{b;ns} := \max(4 \cdot d_b, p_2, 2 \cdot e_2) = 96.00\ mm$

## Netto sectie bezwijken

Een netto-sectie breedte van 4 de boutdiameter is aangehouden.

$f_{y;t;Rd} := 8.651\ GPa \cdot 0.6\% = 51.91\ MPa$ rekenwaarde trek in y-richting

$w := 4 \cdot d_b = 96.00\ mm$ vereiste breedte bij de verbinding (is lengte-richting brug)

$k_{m1ns} := 2$

$k_{m22ns} := 1$ spanningsconcentratie factoren, geen rotatie van de bout

$k_{mns} := k_{m1ns} \cdot k_{m22ns} = 2.00$ totale spanningsconcentratie factoren

$k_{tc1} := 2$ spanningsconcentratiefactor laminaat

$t_{lam} = 18.00\ mm$ minimale dikte laminaat rand

$$\sigma_{netsection} := \frac{k_{mns} \cdot k_{tc1} \cdot \frac{P \cdot C_{ri}}{n_{col}}}{(w - d_{hole}) \cdot t_{lam}} = 22.03\ MPa$$ optredende netto sectiespanning per bout

$$UC_{netsection} := \frac{\sigma_{netsection}}{f_{y;t;Rd}} = 0.42$$

## Uitschuiven

$f_{xybodemRd} := 2.938\ GPa \cdot 0.8\% = 23.5\ MPa$ rekenwaarde schuifspanning in xy-richting

$k_{m1shear} := 2.0$ spanningsconcentratie factoren, geen rotatie van de bout

$k_{m2shear} := 1.0$

$k_{mshear} := k_{m1shear} \cdot k_{m2shear}$ totale spanningsconcentratie factoren

$$\tau_{penafschuiving} := \frac{k_{mshear} \cdot \frac{P \cdot C_{ri}}{n_{col}}}{(2 \cdot e_1 - d_{hole}) \cdot t_{lam}} = 4.63\ MPa$$ optredende uitschuifspanning per bout

$$UC_{shearout} := \frac{\tau_{penafschuiving}}{f_{xybodemRd}} = 0.20$$

## Uittrekken

$d_r := 30\ mm$ buitendiameter schroefdraad

$k_{sc1} := 2$ reductiefactor

$\tau_{z;Rd} := 1.4\ GPa \cdot 0.8\% = 11.20\ MPa$ interlaminaire schuifsterkte

$$F_{zt;1;Rd} := \frac{\tau_{z;Rd} \cdot \pi \cdot d_r \cdot t_{lam}}{k_{sc1}} = 9.5\ kN$$ uittrek weerstand

$e_z := 80\ mm$ excentriciteit boutverbinding

$M_x := P \cdot e_z = 1.84\ kN \cdot m$ Optredend moment

---

$k_{mv} = 1.00$ Krachtverdeling (deel van last op kritieke boutrij)

$z_{con} := 200\ mm$ Hoogte tussen bouten

$F_{zt;Ed} := k_{mv} \cdot \frac{M_x}{z_{con} \cdot n_{col}} = 4.6\ kN$ Trekkracht in individuele bout

$UC_{tearout} := \frac{F_{zt;Ed}}{F_{zt;l;Rd}} = 0.48$

## Gecombineerd in vlaktedruk en trek

$UC_{com} := UC_{tearout} + UC_{bearing} = 1.23$

## Resultaten

| | |
|---|---|
| $UC_{bearing} = 0.74$ | is < 1, OK |
| $UC_{netsection} = 0.42$ | is < 1, OK |
| $UC_{shearout} = 0.2$ | is < 1, OK |
| $UC_{tearout} = 0.48$ | is < 1, OK |
| $UC_{com} = 1.23$ | is > 1, niet OK |

## Benodigde afmetingen beugel

$d_{bar} := 18\ mm$ ophangstang diameter

$f_y := 355\ MPa$ vloeispanning staal

$f_u := 510\ MPa$ uiterste staalspanning

$\Delta L := 3\ mm$ uitzettingsmarge

$e_{bar} := 10\ mm + 2 \cdot \Delta L + \frac{d_{bar}}{2} = 25.00\ mm$ excentriciteit ophangstuk

$A_{bar} := \frac{\pi \cdot d_{bar}^{2}}{4} = 2.54\ cm^2$ Oppervalkte ophanhstang

$W_{bar} := \pi \cdot \frac{d_{bar}^{3}}{32} \cdot 1.698 = (972.20 \cdot 10^{-3})\ cm^3$ Weerstands oppervlakte ophangstang

$P = 23.00\ kN$ Oplegkracht; incl. combinatie factoren

$M_{bar} := e_{bar} \cdot P = 0.58\ kN \cdot m$ Moment door excentriciteit

$\sigma_{Ed;bar} := \frac{\frac{M_{bar}}{2}}{W_{bar}} = 295.72\ MPa$ Buigspanning is ophangstang

$uc_{bar} := \frac{\sigma_{Ed;bar}}{f_y} = 0.83$ unity check ophangstang op buiging

## Checks lepel

$t_{lepel} := 10\ mm$ Dikte lepelplaat

$b_{lepel} := 50\ mm$ Breedte lepelplaat

$h_{lepel} := 90\ mm$ Hoogte lepellijfplaat

$t_{lijf;lepel} := 8\ mm$ Dikte lepellijfplaat

$b_{2;lepel} := 50\ mm$ Breedte lepelplaat

$e_{lepel;1} := \frac{d_{bar}}{2} + \Delta L$ Afstand oplegging tot lijfplaten

$e_{lepel;2} := e_{lepel;1} + 30\ mm + 23\ mm = 65.00\ mm$ Afstand oplegging tot bouten

$W_{lepel;1} := \frac{1}{6} \cdot b_{lepel} \cdot t_{lepel}^{2} = (833.33 \cdot 10^{-3})\ cm^3$ Buigweerstand lepel zonder lijfplaat

$M_{lepel;1} := P \cdot e_{lepel;1} = (276.00 \cdot 10^{-3})\ kN \cdot m$ Moment lepel bij eind lijfplaat

$\sigma_{Ed;lepel;1} := \frac{M_{lepel;1}}{W_{lepel;1}} = 331.20\ MPa$ Spanning lepel bij eind lijfplaat

$uc_{lepel;1} := \frac{\sigma_{Ed;lepel;1}}{f_y} = 0.93$ unity check lepel bij eind lijfplaat

**Doorsnede eigenschappen lepel met lijfplaat**

$$e_{z;lepel;2} := \frac{\frac{1}{2}\cdot t_{lijf;lepel}\cdot h_{lepel}^{\,2} + t_{lepel}\cdot b_{2;lepel}\cdot\left(h_{lepel}+\frac{1}{2}\cdot t_{lepel}\right)}{t_{lijf;lepel}\cdot h_{lepel} + b_{2;lepel}\cdot t_{lepel}} = 65.49\ mm$$

$$I_{lepel;2} := b_{2;lepel}\cdot t_{lepel}\cdot\left(\left(\frac{1}{12}\cdot t_{lepel}\right)^2 + \left(h_{lepel}+t_{lepel}-e_{z;lepel;2}\right)^2\right) = 106.87\ cm^4$$
$$+ h_{lepel}\cdot t_{lijf;lepel}\cdot\left(\left(\frac{1}{12}\cdot h_{lepel}\right)^2 + \left(h_{lepel}-e_{z;lepel;2}\right)^2\right)$$

$M_{lepel;2} := P\cdot e_{lepel;2} = 1.50\ kN\cdot m$ Moment lepel bij bouten

$\sigma_{Ed;lepel;2} := \frac{M_{lepel;2}}{I_{lepel;2}}\cdot e_{z;lepel;2} = 91.61\ MPa$ Spanning lepel bij bouten

$uc_{lepel;2} := \frac{\sigma_{Ed;lepel;2}}{f_y} = 0.26$ unity check lepel bij bouten

## Bouten in lijf ligger

$d_{bout} := 16\ mm$ Bout diameter

$d_0 := 18\ mm$ Boutgat diameter

$f_{yb} := 640\ MPa$ vloeispanning staal bout

$f_{ub} := 800\ MPa$ uiterste staalspanning bout

$t := 6.5\ mm$ Dikte lijf HEA

**Minimale randafstanden**

$e_1 := 1.2\cdot d_0 = 22\ mm$ $e_2 := 1.2\cdot d_0 = 22\ mm$ $p_1 := 2.2\cdot d_0 = 40\ mm$ $p_2 := p_1$

**Boutkracht factoren**

$$k_1 := min\left(2.8\cdot\frac{e_1}{d_0} - 1.7, 1.4\cdot\frac{p_1}{d_0} - 1.7, 2.5\right) = 1.38$$

$\alpha_d := \frac{e_1}{3\cdot d_0}$ $\alpha_b := min\left(\alpha_d, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0\right)$

**Materiaal factoren**

$\gamma_{M2} := 1.25$

**Krachten in boutverbinding**

$M_{boutverbinding} := M_{lepel;2} = 1.50\ kN\cdot m$ Moment bij boutverbinding

$V_M := \frac{M_{boutverbinding}}{p_1} = 37.75\ kN$ Dwarskracht door moment

$V_{Ed} := \sqrt{V_M^{\,2} + \left(\frac{P}{2}\right)^2} = 39.47\ kN$ Totale dwarskracht in bouten

$F_{b;Rd} := \frac{k_1\cdot\alpha_b\cdot f_u\cdot d_{bout}\cdot t}{\gamma_{M2}} = 23.42\ kN$ Stuikweerstand in lijf

$u.c. := \frac{V_{Ed}}{2\cdot F_{b;Rd}} = 0.84$ Unity check stuik lijf

## Las lepel

$P = 23.00\ kN$ — Oplegkracht; incl. combinatie factoren

$l_{las} := 76\ mm$ — Lengte las

$t_{las} := 4\ mm$ — Dikte las

$n_{las} := 2$ — Aantal lassen

$\beta_w := 0.9$ — Las weerstands factor

### krachten in las

$\tau_{dwars} := \frac{P}{l_{las} \cdot t_{las} \cdot n_{las}} = 37.83\ MPa$ — Schuifspanning dwars in las door dwarskracht

$\sigma_{Ed;lepel;top} := \frac{M_{lepel;2}}{I_{lepel;2}} \cdot \left(h_{lepel} + t_{lepel} - e_{z;lepel;2}\right) = 48.27\ MPa$ — Normaalspanning bovenzijde flens lepel

$\sigma_{Ed;lepel;bot} := \frac{M_{lepel;2}}{I_{lepel;2}} \cdot \left(h_{lepel} - e_{z;lepel;2}\right) = 34.28\ MPa$ — Normaalspanning Onderzijde flens lepel

$R_x := \frac{\sigma_{Ed;lepel;top} + \sigma_{Ed;lepel;bot}}{2} \cdot t_{lepel} \cdot b_{lepel} = 20.64\ kN$ — Totale normaalkracht in flens lepel

$\tau_{lr} := \frac{R_x}{l_{las} \cdot t_{las} \cdot n_{las}} = 33.95\ MPa$ — Schuifspanning loodrecht in las door buiging

$u.c._{las;lepel} := \frac{\sqrt{3 \cdot \left(\tau_{lr}^{\ 2} + \tau_{dwars}^{\ 2}\right)}}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w \cdot f_u} = 0.15$ — unity check las

# Bijlage VIII

## Reactiekrachten

Bepaling reactiekrachten op landhoofd en steunpunten
Reefbrug

Haskoning
Enhancing Society Together

Haskoning
Enhancing Society Together

# Reactiekrachten

**Structural**

Project: BJ7949 Vo Reefbrug
Auteur: Coen Cosijn
Version: 1.0
Date: 27/07/26
Subject: Bepaling reactiekrachten op onderbouw

| Verticaal; Eigen gewicht | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Onderdeel | Soortelijke massa | Steunpunt Wortel | | Steunpunt Tip | | Landhoofd Wortel | | Landhoofd Tip | |
| Turbineligger | 4.200 kg/ ligger | 1,3 [-] | 5292 kg | 0,7 [-] | 3108 kg | 0,0 [-] | 0,0 kg | 0,0 [-] | 0,0 kg |
| Dek | 65 kg/ m² | 18 m² | 1138 kg | 17,5 m² | 1138 kg | 0,0 m² | 0,0 kg | 0,0 m² | 0,0 kg |
| Slijtlaag | 15 kg/ m² | 18 m² | 262,5 kg | 17,5 m² | 262,5 kg | 0,0 m² | 0,0 kg | 0,0 m² | 0,0 kg |
| Leuning | 100 kg/m | 14,0 m | 1400 kg | 14,0 m | 1400 kg | 0,0 m | 0,0 kg | 0,0 m | 0,0 kg |
| Dwarsbalken | 20 kg/m | 14,0 m | 280 kg | 14,0 m | 280 kg | 0,0 m | 0,0 kg | 0,0 m | 0,0 kg |
| Aanbruggen | 487,5 kg/m | 2,0 m | 975 kg | 1,95 m | 950,6 kg | 2,0 m | 975 kg | 1,95 m | 950,6 kg |
| Totaal | 1178 kg/m | 57% [-] | 9347 kg | 43% [-] | 7139 kg | [-] | 975 kg | [-] | 950,6 kg |
| Combinatie (E.G. overheers.) | | | 110 kN | | 84 kN | | 11 kN | | 11 kN |
| Combinatie (g.v.b. overheers.) | | | 100,9 kN | | 77,0 kN | | 10,5 kN | | 10,3 kN |
| Combinatie (wind overheers.) | | | 100,9 kN | | 77,0 kN | | 10,5 kN | | 10,3 kN |
| **Verticaal; belasting** | | | | | | | | | |
| Mensenmassa | 475 kg/m² | 23 m² | 10688 kg | 22,4 m² | 10628 kg | 5 m² | 2375 kg | 4,88 m² | 2316 kg |
| Combinatie (E.G. overheers.) | | | 50 kN | | 50 kN | | 11 kN | | 11 kN |
| Combinatie (g.v.b. overheers.) | | | 126 kN | | 125 kN | | 28 kN | | 27 kN |
| Combinatie (wind overheers.) | | | 50 kN | | 50 kN | | 11 kN | | 11 kN |
| **Horizontaal; dwars belasting** | | | | | | | | | |
| Windkracht | 423 kg/m | 11 m | 4653 kg | 10,9 m | 4611 kg | 0,0 m | 0 kg | 0 m | 0,0 kg |
| Combinatie (E.G. overheers.) | | | 49,3 kN | | 48,9 kN | | 0,0 kN | | 0,0 kN |
| Combinatie (g.v.b. overheers.) | | | 49,3 kN | | 48,9 kN | | 0,0 kN | | 0,0 kN |
| Combinatie (wind overheers.) | | | 61,6 kN | | 61,1 kN | | 0,0 kN | | 0,0 kN |
| **Horizontaal; langs-belasting** | | | | | | | | | |
| Remkracht | 47,5 kg/m² | 23 m² | 1069 kg | 22,4 m² | 1063 kg | 2,0 m² | 95,0 kg | 1,9 m² | 90,3 kg |
| Combinatie (E.G. overheers.) | | | 5,0 kN | | 5,0 kN | | 0,4 kN | | 0,4 kN |
| Combinatie (g.v.b. overheers.) | | | 12,6 kN | | 12,5 kN | | 1,1 kN | | 1,1 kN |
| Combinatie (wind overheers.) | | | 5,0 kN | | 5,0 kN | | 0,4 kN | | 0,4 kN |

| Resultaat | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Combinatie | Last | Totaal | SP Wortel | SP Tip | LH Wortel | LH Tip |
| E.G. overheersend | Verticale belasting | 339 kN | 160 kN | 134 kN | 23 kN | 22 kN |
| | Horizontaal; dwars-belasting | 98,2 kN | 49,3 kN | 48,9 kN | 0,0 kN | 0,0 kN |
| | Horizontaal; langs-belasting | 10,9 kN | 5,0 kN | 5,0 kN | 0,4 kN | 0,4 kN |
| g.v.b. overheersend | Verticale belasting | 504,8 kN | 226,7 kN | 202,1 kN | 38,5 kN | 37,5 kN |
| | Horizontaal; dwars-belasting | 98,2 kN | 49,3 kN | 48,9 kN | 0,0 kN | 0,0 kN |
| | Horizontaal; langs-belasting | 27,3 kN | 12,6 kN | 12,5 kN | 1,1 kN | 1,1 kN |
| wind overheersend | Verticale belasting | 321,1 kN | 151,2 kN | 127,1 kN | 21,7 kN | 21,2 kN |
| | Horizontaal; dwars-belasting | 122,7 kN | 61,6 kN | 61,1 kN | 0,0 kN | 0,0 kN |
| | Horizontaal; langs-belasting | 10,9 kN | 5,0 kN | 5,0 kN | 0,4 kN | 0,4 kN |

*E.G. = Eigen gewicht, g.v.b. = Gelijkmatig verdeelde belasting, overheers. = overheersend*

# Bijlage IX

## Bepaling karakteristieke waarden uit testen

Verwerken van ruwe testdata naar rekenwaarden.

Haskoning
Enhancing Society Together

## Testresulaten Trek -V3

| Panel | Material ID | Coupon | Width [mm] | Thickness [mm] | Fibre angle front [°] | Fibre angle back [°] | E11 [GPa] | Strength σ11 [MPa] | Linear strain at failure [-] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 1B_1 | 25.79 | 4.33 | – | – | 14.3 | 167 | 0.0117 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 1C_1 | 25.78 | 4.31 | – | – | 14.7 | 153 | 0.0105 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 1D_1 | 25.84 | 4.33 | – | – | 12.7 | 170 | 0.0134 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 1E_1 | 25.84 | 4.36 | – | – | 12.3 | 175 | 0.0142 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 1F_1 | 25.83 | 4.41 | – | – | 13.1 | 160 | 0.0122 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 1H_1 | 25.83 | 4.11 | – | – | 11.7 | 159 | 0.0135 |
| E-TP-P-r | multi_TP_2 | 1B_3 | 26.04 | 2.1 | – | – | 9.1 | 140 | 0.0153 |
| E-TP-P-r | multi_TP_2 | 1C_3 | 25.98 | 1.68 | – | – | 10.1 | 168 | 0.0167 |
| E-TP-P-r | multi_TP_2 | 1D_3 | 26.01 | 1.73 | – | – | 8.9 | 132 | 0.0148 |
| E-TP-P-r | multi_TP_2 | 1E_3 | 25.99 | 2.21 | – | – | 9 | 122 | 0.0136 |
| E-TP-P-r | multi_TP_2 | 1F_3 | 25.98 | 1.75 | – | – | 9.1 | 143 | 0.0158 |
| E-TP-P-r | UD | 1C_2 | 25.9 | 4.08 | 2 | 3 | 33.3 | 404 | 0.0121 |
| E-TP-P-r | UD | 1D_2 | 25.9 | 3.18 | 2 | 3 | 35.7 | 450 | 0.0126 |
| E-TP-P-r | UD | 1E_2 | 25.93 | 3.44 | 3 | 4 | 31 | 453 | 0.0146 |
| E-TP-P-r | UD | 1F_2 | 25.9 | 3.88 | 2 | 3 | 30 | 472 | 0.0157 |
| E-TP-P-r | UD | 1H_2 | 25.85 | 2.79 | 2 | 3 | 25.7 | 410 | 0.0135 |
| E-LP-P-r | UD | 2B_2 | 25.79 | 3.98 | 4 | 2 | 24.3 | 475 | 0.0196 |
| E-LP-P-r | UD | 2B_4 | 25.95 | 5.05 | 0 | 1 | 30.1 | 503 | 0.0167 |
| E-LP-P-r | UD | 2D_4 | 25.96 | 4.74 | 3 | 2 | 27.9 | 416 | 0.0149 |
| E-LP-P-r | UD | 2E_3 | 26.02 | 3.02 | 3 | 2 | 26.8 | 468 | 0.0175 |
| E-LP-P-r | UD | 2E_4 | 25.97 | 2.84 | 2 | 2 | 25.2 | 411 | 0.0163 |

## Testresulaten Druk - V3

| Panel | Material ID | Coupon | Width [mm] | Thickness [mm] | Fibre angle front [°] | Fibre angle back [°] | E11 [GPa] | Strength σ11 [MPa] | Linear strain at failure [-] | Strain at failure, recorded [-] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 4B_1 | 25.87 | 5.36 | – | – | 7.3 | 124 | 0.0161 | 0.0222 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 4C_1 | 25.79 | 4.71 | – | – | 8.1 | 124 | 0.0139 | 0.0177 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 4F_1 | 25.68 | 4.41 | – | – | 11.2 | 195 | 0.0168 | 0.0149 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 4H_1 | 25.77 | 4.06 | – | – | 11 | 185 | 0.0162 | 0.0198 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 4L_1 | 25.84 | 3.51 | – | – | 11.2 | 204 | 0.0172 | 0.0223 |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 4M_1 | 25.7 | 4.39 | – | – | 13.9 | 201 | 0.0138 | 0.0151 |
| E-TP-P-r | UD | 4F_3 | 25.83 | 5.82 | 1 | 1 | 27 | 373 | 0.0138 | 0.0133 |
| E-TP-P-r | UD | 4F_4 | 26.06 | 6.31 | 0 | 4 | 23.8 | 372 | 0.0156 | 0.0173 |
| E-TP-P-r | UD | 4L_2 | 25.77 | 6.48 | 0 | 1 | 26.1 | 333 | 0.0128 | 0.0148 |
| E-TP-P-r | UD | 4M_2 | 25.74 | 5.05 | 0 | 0 | 26.4 | 395 | 0.015 | 0.0137 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E-TP-P-r | UD | 4M_3 | 25.82 | 4.42 | 0 | 2 | 23.8 | 375 | 0.0158 | 0.0148 |
| E-TP-P-r | UD | 4M_4 | 25.9 | 8.08 | 0 | 3 | 26.6 | 338 | 0.0127 | 0.0138 |
| | | | | | | | | | | |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 3A_1 | 25.73 | 2.39 | – | – | 10.3 | – | – | – |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 3B_1 | 25.72 | 3.1 | – | – | 10.9 | – | – | – |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 3D_1 | 25.77 | 3.14 | – | – | 8.6 | – | – | – |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 3E_1 | 25.79 | 3.95 | – | – | 12.8 | – | – | – |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 3F_1 | 25.84 | 3.67 | – | – | 9.2 | – | – | – |
| E-LP-P-r | UD | 3A_3 | 25.89 | 7.22 | 3 | 2 | 34.7 | 380 | 0.0109 | 0.099 |
| E-LP-P-r | UD | 3B_3 | 25.91 | 6.07 | 1 | 1 | 28.6 | 413 | 0.0144 | 0.0134 |
| E-LP-P-r | UD | 3C_2 | 25.82 | 5.44 | 1 | 3 | 29 | 455 | 0.0157 | 0.0168 |
| E-LP-P-r | UD | 3D_3 | 25.9 | 5.35 | 2 | 2 | 31.8 | 377 | 0.0190 | 0.0120 |
| E-LP-P-r | UD | 3E_2 | 25.86 | 5.6 | 2 | 3 | 24.2 | 372 | 0.0154 | 0.0152 |

## Berekening instellingen

$V_x :=$ Bekend

Is variatie van materiaal bekend?

$Verdeling :=$ Lognormaal

Verdeling van materiaaleigenschappen

## 1. Gecombineerde (Pooled) waardes voor UD-trek

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;T;UD} := \text{length}\left(E_{11;T;UD}\right) = 10$ — Aantal samples

$n_{\sigma 11;T;UD} := \text{length}\left(\sigma_{11;T;UD}\right) = 10$

$n_{\varepsilon 11;T;UD} := \text{length}\left(\varepsilon_{11;T;UD}\right) = 10$

$m_{x;E11;T;UD} := \text{mean}\left(E_{11;T;UD}\right) = 29\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;T;UD} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;T;UD}}{\textbf{\textit{GPa}}}\right)}{n_{E11;T;UD}} = 3.4$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;T;UD} := \text{Stdev}\left(E_{11;T;UD}\right) = 3.7\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Standaard afwijking

$V_{x;E11;T;UD} := \dfrac{s_{x;E11;T;UD}}{m_{x;E11;T;UD}} = 0.13$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;T;UD} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;T;UD}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.13$ — Log variatie

$k_{n;E11;T;UD} := k_{n_{n_{E11;T;UD}-1},\,V_x} = 1.72$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakteristieke waarden

$E_{11;T;UD;k} := E_{11;T;UD;ks_{Verdeling}} = 23.1\ \textbf{\textit{GPa}}$ — E-modulus

$\sigma_{11;T;UD;k} := \sigma_{11;T;UD;ks_{Verdeling}} = 390.2\ \textbf{\textit{MPa}}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;T;UD;k} := \varepsilon_{11;T;UD;ks_{Verdeling}} = 1.18\%$ — Lineare rekgrens

### Gemiddelde waarden

$E_{11;T;UD;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;T;UD}, m_{x;E11;T;UD}\right)$ — E -modulus gemiddelde waarde

$m_{x;E11;T;UD} = 29\ \textbf{\textit{GPa}}$

## 2. Gecombineerde (Pooled) waardes voor Multi-trek - NB dit is T_TP1 ; T_TP 2 is apart beschouwd en LP trek vervallen

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;T;Multi} := \text{length}\left(E_{11;T;Multi}\right) = 6$ — Aantal samples

$m_{x;E11;T;Multi} := \text{mean}\left(E_{11;T;Multi}\right) = 13.1\ \textbf{GPa}$ — Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;T;Multi} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;T;Multi}}{\textbf{GPa}}\right)}{n_{E11;T;Multi}} = 2.6$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;T;Multi} := \text{Stdev}\left(E_{11;T;Multi}\right) = 1.16\ \textbf{GPa}$ — Standaard afwijking

$V_{x;E11;T;Multi} := \dfrac{s_{x;E11;T;Multi}}{m_{x;E11;T;Multi}} = 0.09$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;T;Multi} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;T;Multi}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.09$ — Log variatie

$k_{n;E11;T;Multi} := k_{n_{E11;T;Multi}-1,\,V_x} = 1.77$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakteristieke waarden

$E_{11;T;Multi;k} := E_{11;T;Multi;ks_{Verdeling}} = 11.2\ \textbf{GPa}$ — E-modulus -karakteristiek verdeling

$\sigma_{11;T;Multi;k} := \sigma_{11;T;Multi;ks_{Verdeling}} = 150.1\ \textbf{MPa}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;T;Multi;k} := \varepsilon_{11;T;Multi;ks_{Verdeling}} = 1.03\%$ — Lineaire rekgrens

### Gemiddelde waarden

$E_{11;T;Multi;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;T;Multi}, m_{x;E11;T;Multi}\right)$ — E -modulus gemiddelde waarde

$m_{x;E11;T;Multi} = 13.133\ \textbf{GPa}$

## 3. Gecombineerde (Pooled) waardes voor UD-druk

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;C;UD} := \text{length}\left(E_{11;C;UD}\right) = 11$ — Aantal samples

$m_{x;E11;C;UD} := \text{mean}\left(E_{11;C;UD}\right) = 27.5\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;C;UD} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;C;UD}}{\textbf{\textit{GPa}}}\right)}{n_{E11;C;UD}} = 3.3$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;C;UD} := \text{Stdev}\left(E_{11;C;UD}\right) = 3.41\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Standaard afwijking

$V_{x;E11;C;UD} := \dfrac{s_{x;E11;C;UD}}{m_{x;E11;C;UD}} = 0.12$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;C;UD} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;C;UD}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.12$ — Log variatie

$k_{n;E11;C;UD} := k_{n_{n_{E11;C;UD}-1},\,V_x} = 1.716$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakteristieke waarden

$E_{11;C;UD;k} := E_{11;C;UD;ks_{Verdeling}} = 22.1\ \textbf{\textit{GPa}}$ — E-modulus

$\sigma_{11;C;UD;k} := \sigma_{11;C;UD;ks_{Verdeling}} = 326.1\ \textbf{\textit{MPa}}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;C;UD;k} := \varepsilon_{11;C;UD;ks_{Verdeling}} = 1.13\%$ — Lineaire rekgrens

$\varepsilon r_{11;C;UD;k} := \varepsilon r_{11;C;UD;ks_{Verdeling}} = 0.36\%$ — Waargenomen rekgrens

### Gemiddelde waarden

$E_{11;C;UD;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;C;UD}, m_{x;E11;C;UD}\right)$ — E -modulus gemiddelde waarde

$m_{x;E11;C;UD} = 27.455\ \textbf{\textit{GPa}}$

## 4. Gecombineerde (Pooled) waardes voor Multi-druk

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;C;Multi} := \text{length}\left(E_{11;C;Multi}\right) = 11$ — Aantal samples

$n_{\sigma 11;C;Multi} := \text{length}\left(\sigma_{11;C;Multi}\right) = 6$

$n_{\varepsilon 11;C;Multi} := \text{length}\left(\varepsilon_{11;C;Multi}\right) = 6$

$n_{\varepsilon r 11;C;Multi} := \text{length}\left(\varepsilon r_{11;C;Multi}\right) = 6$

$m_{x;E11;C;Multi} := \text{mean}\left(E_{11;C;Multi}\right) = 10.4\ \boldsymbol{GPa}$ — Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;C;Multi} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;C;Multi}}{\boldsymbol{GPa}}\right)}{n_{E11;C;Multi}} = 2.3$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;C;Multi} := \text{Stdev}\left(E_{11;C;Multi}\right) = 1.99\ \boldsymbol{GPa}$ — Standaard afwijking

$V_{x;E11;C;Multi} := \dfrac{s_{x;E11;C;Multi}}{m_{x;E11;C;Multi}} = 0.19$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;C;Multi} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;C;Multi}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.19$ — Log variatie

$k_{n;E11;C;Multi} := k_{n_{n_{E11;C;Multi}-1},\,V_x} = 1.716$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakteristieke waarden

$E_{11;C;Multi;k} := E_{11;C;Multi;ks_{Verdeling}} = 7.4\ \boldsymbol{GPa}$ — E-modulus

$\sigma_{11;C;Multi;k} := \sigma_{11;C;Multi;ks_{Verdeling}} = 114.6\ \boldsymbol{MPa}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;C;Multi;k} := \varepsilon_{11;C;Multi;ks_{Verdeling}} = 1.32\%$ — Lineaire rekgrens

$\varepsilon r_{11;C;Multi;k} := \varepsilon r_{11;C;Multi;ks_{Verdeling}} = 1.35\%$ — Waargenomen rekgrens

## Gemiddelde waarden

$E_{11;C;Multi;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;C;Multi}, m_{x;E11;C;Multi}\right)$ E -modulus gemiddelde waarde

$m_{x;E11;C;Multi} = 10.409\ \textbf{\textit{GPa}}$

## 11. LP batch waardes voor UD-trek

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;T;UD;LP} := \text{length}\left(E_{11;T;UD;LP}\right) = 5$ Aantal samples

$m_{x;E11;T;UD;LP} := \text{mean}\left(E_{11;T;UD;LP}\right) = 26.9\ \textbf{\textit{GPa}}$ Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;T;UD;LP} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;T;UD;LP}}{\textbf{\textit{GPa}}}\right)}{n_{E11;T;UD;LP}} = 3.3$ Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;T;UD;LP} := \text{Stdev}\left(E_{11;T;UD;LP}\right) = 2.29\ \textbf{\textit{GPa}}$ Standaard afwijking

$V_{x;E11;T;UD;LP} := \dfrac{s_{x;E11;T;UD;LP}}{m_{x;E11;T;UD;LP}} = 0.09$ Variatie coëfficient

$s_{y;E11;T;UD;LP} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;T;UD;LP}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.08$ Log variatie

$k_{n;E11;T;UD;LP} := k_{n_{n_{E11;T;UD;LP}-1}, V_x} = 1.8$ Afwijking vanaf gemiddelde

## Karakteristieke waarden

$E_{11;T;UD;LP;k} := E_{11;T;UD;LP;ks_{Verdeling}} = 23\ \textbf{\textit{GPa}}$ E-modulus

$\sigma_{11;T;UD;LP;k} := \sigma_{11;T;UD;LP;ks_{Verdeling}} = 387.3\ \textbf{\textit{MPa}}$ Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;T;UD;LP;k} := \varepsilon_{11;T;UD;LP;ks_{Verdeling}} = 1.41\%$ Lineare rekgrens

## Gemiddelde waarden

$E_{11;T;UD;LP;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;T;UD;LP}, m_{x;E11;T;UD;LP}\right)$ E -modulus gemiddelde waarde

$m_{x;E11;T;UD;LP} = 26.86\ \textbf{\textit{GPa}}$

## 12. TP batch waardes voor UD-trek

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;T;UD;TP} := \text{length}\left(E_{11;T;UD;TP}\right) = 5$ — Aantal samples

$m_{x;E11;T;UD;TP} := \text{mean}\left(E_{11;T;UD;TP}\right) = 31.1\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;T;UD;TP} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;T;UD;TP}}{\textbf{\textit{GPa}}}\right)}{n_{E11;T;UD;TP}} = 3.4$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;T;UD;TP} := \text{Stdev}\left(E_{11;T;UD;TP}\right) = 3.75\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Standaard afwijking

$V_{x;E11;T;UD;TP} := \dfrac{s_{x;E11;T;UD;TP}}{m_{x;E11;T;UD;TP}} = 0.12$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;T;UD;TP} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;T;UD;TP}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.12$ — Log variatie

$k_{n;E11;T;UD;TP} := k_{n_{n_{E11;T;UD;TP}-1},\,V_x} = 1.8$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakteristieke waarden

$E_{11;T;UD;TP;k} := E_{11;T;UD;TP;ks_{Verdeling}} = 24.9\ \textbf{\textit{GPa}}$ — E-modulus

$\sigma_{11;T;UD;TP;k} := \sigma_{11;T;UD;TP;ks_{Verdeling}} = 387.2\ \textbf{\textit{MPa}}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;T;UD;TP;k} := \varepsilon_{11;T;UD;TP;ks_{Verdeling}} = 1.13\%$ — Lineare rekgrens

### Gemiddelde waarden

$E_{11;T;UD;TP;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;T;UD;TP}, m_{x;E11;T;UD;TP}\right)$ — E -modulus gemiddelde waarde

$m_{x;E11;T;UD;TP} = 31.14\ \textbf{\textit{GPa}}$

## 14.a TP batch waardes voor Multi-trek - TP_1

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;T;Multi;TP} := \text{length}\left(E_{11;T;Multi;TP}\right) = 6$ — Aantal samples

$m_{x;E11;T;Multi;TP} := \text{mean}\left(E_{11;T;Multi;TP}\right) = 13.1\ \textit{GPa}$ — Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;T;Multi;TP} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;T;Multi;TP}}{\textit{GPa}}\right)}{n_{E11;T;Multi;TP}} = 2.6$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;T;Multi;TP} := \text{Stdev}\left(E_{11;T;Multi;TP}\right) = 1.16\ \textit{GPa}$ — Standaard afwijking

$V_{x;E11;T;Multi;TP} := \dfrac{s_{x;E11;T;Multi;TP}}{m_{x;E11;T;Multi;TP}} = 0.09$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;T;Multi;TP} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;T;Multi;TP}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.09$ — Log variatie

$k_{n;E11;T;Multi;TP} := k_{n_{n_{E11;T;Multi;TP}-1},\,V_x} = 1.77$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakteristieke waarden

$E_{11;T;Multi;TP;k} := E_{11;T;Multi;TP;ks_{Verdeling}} = 11.2\ \textit{GPa}$ — E-modulus

$\sigma_{11;T;Multi;TP;k} := \sigma_{11;T;Multi;TP;ks_{Verdeling}} = 150.1\ \textit{MPa}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;T;Multi;TP;k} := \varepsilon_{11;T;Multi;TP;ks_{Verdeling}} = 1.03\%$ — Lineaire rekgrens

### Gemiddelde waarden

$E_{11;T;Multi;TP;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;T;Multi;TP}, m_{x;E11;T;Multi;TP}\right)$ — E -modulus gemiddelde waarde

$m_{x;E11;T;Multi;TP} = 13.133\ \textit{GPa}$

## 14.b TP batch waardes voor Multi-trek - TP_2

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;T;Multi;TP2} := \text{length}\left(E_{11;T;Multi;TP2}\right) = 5$ — Aantal samples

$m_{x;E11;T;Multi;TP2} := \text{mean}\left(E_{11;T;Multi;TP2}\right) = 9.2\ \textit{GPa}$ — Gemmidelde waarde

$$m_{y;E11;T;Multi;TP2} := \frac{\sum \ln\left(\frac{E_{11;T;Multi;TP2}}{\textit{GPa}}\right)}{n_{E11;T;Multi;TP2}} = 2.2$$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;T;Multi;TP2} := \text{Stdev}\left(E_{11;T;Multi;TP2}\right) = 0.49\ \textit{GPa}$ — Standaard afwijking

$$V_{x;E11;T;Multi;TP2} := \frac{s_{x;E11;T;Multi;TP2}}{m_{x;E11;T;Multi;TP2}} = 0.05$$ — Variatie coëfficient

$$s_{y;E11;T;Multi;TP2} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;T;Multi;TP2}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.05$$ — Log variatie

$$s_{y;\sigma 11;T;Multi;TP2} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;\sigma 11;T;Multi;TP2}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.121$$

$$s_{y;\varepsilon 11;T;Multi;TP2} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;\varepsilon 11;T;Multi;TP2}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.076$$

$k_{n;E11;T;Multi;TP2} := k_{n_{n_{E11;T;Multi;TP2}-1},\,V_x} = 1.8$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakterstieke waarden

$E_{11;T;Multi;TP;k2} := E_{11;T;Multi;TP;ks2_{Verdeling}} = 8.4\ \textit{GPa}$ — E-modulus

$\sigma_{11;T;Multi;TP;k2} := \sigma_{11;T;Multi;TP;ks2_{Verdeling}} = 112.7\ \textit{MPa}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;T;Multi;TP;k2} := \varepsilon_{11;T;Multi;TP;ks2_{Verdeling}} = 1.33\%$ — Lineaire rekgrens

### Gemiddelde waarden

$E_{11;T;Multi;TP;ks2} := \text{stack}\left(m_{x;E11;T;Multi;TP2}, m_{x;E11;T;Multi;TP}\right)$

$m_{x;E11;T;Multi;TP2} = 9.24\ \textit{GPa}$

## 15. LP batch waardes voor UD-druk

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;C;UD;LP} := \text{length}\left(E_{11;C;UD;LP}\right) = 5$ — Aantal samples

$m_{x;E11;C;UD;LP} := \text{mean}\left(E_{11;C;UD;LP}\right) = 29.7\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Gemmidelde waarde

$$m_{y;E11;C;UD;LP} := \frac{\sum \ln\left(\frac{E_{11;C;UD;LP}}{\textbf{\textit{GPa}}}\right)}{n_{E11;C;UD;LP}} = 3.4$$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;C;UD;LP} := \text{Stdev}\left(E_{11;C;UD;LP}\right) = 3.92\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Standaard afwijking

$$V_{x;E11;C;UD;LP} := \frac{s_{x;E11;C;UD;LP}}{m_{x;E11;C;UD;LP}} = 0.13$$ — Variatie coëfficient

$$s_{y;E11;C;UD;LP} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;C;UD;LP}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.13$$ — Log variatie

$k_{n;E11;C;UD;LP} := k_{n_{E11;C;UD;LP}-1,\,V_x} = 1.8$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakterstieke waarden

$E_{11;C;UD;LP;k} := E_{11;C;UD;LP;ks_{Verdeling}} = 23.2\ \textbf{\textit{GPa}}$ — E-modulus

$\sigma_{11;C;UD;LP;k} := \sigma_{11;C;UD;LP;ks_{Verdeling}} = 340.2\ \textbf{\textit{MPa}}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;C;UD;LP;k} := \varepsilon_{11;C;UD;LP;ks_{Verdeling}} = 1.05\%$ — Lineaire rekgrens

$\varepsilon r_{11;C;UD;LP;k} := \varepsilon r_{11;C;UD;LP;ks_{Verdeling}} = 0.38\%$ — Waargenomen rekgrens

### Gemiddelde waarde

$E_{11;C;UD;LP;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;C;UD;LP}, m_{x;E11;C;UD;LP}\right)$

$m_{x;E11;C;UD;LP} = 29.66\ \textbf{\textit{GPa}}$

## 16. TP batch waardes voor UD-druk

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;C;UD;TP} := \text{length}\left(E_{11;C;UD;TP}\right) = 6$ — Aantal samples

$n_{\sigma 11;C;UD;TP} := \text{length}\left(\sigma_{11;C;UD;TP}\right) = 6$

$n_{\varepsilon 11;C;UD;TP} := \text{length}\left(\varepsilon_{11;C;UD;TP}\right) = 6$

$n_{\varepsilon r 11;C;UD;TP} := \text{length}\left(\varepsilon r_{11;C;UD;TP}\right) = 6$

$m_{x;E11;C;UD;TP} := \text{mean}\left(E_{11;C;UD;TP}\right) = 25.6\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Gemmidelde waarde

$$m_{y;E11;C;UD;TP} := \frac{\sum \ln\left(\frac{E_{11;C;UD;TP}}{\textbf{\textit{GPa}}}\right)}{n_{E11;C;UD;TP}} = 3.2$$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;C;UD;TP} := \text{Stdev}\left(E_{11;C;UD;TP}\right) = 1.44\ \textbf{\textit{GPa}}$ — Standaard afwijking

$$V_{x;E11;C;UD;TP} := \frac{s_{x;E11;C;UD;TP}}{m_{x;E11;C;UD;TP}} = 0.06$$ — Variatie coëfficient

$$s_{y;E11;C;UD;TP} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;C;UD;TP}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.06$$ — Log variatie

$k_{n;E11;C;UD;TP} := k_{n_{n_{E11;C;UD;TP}-1},\,V_x} = 1.77$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakterstieke waarden

$E_{11;C;UD;TP;k} := E_{11;C;UD;TP;ks_{Verdeling}} = 23.2\ \textbf{\textit{GPa}}$ — E-modulus

$\sigma_{11;C;UD;TP;k} := \sigma_{11;C;UD;TP;ks_{Verdeling}} = 323.8\ \textbf{\textit{MPa}}$ — Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;C;UD;TP;k} := \varepsilon_{11;C;UD;TP;ks_{Verdeling}} = 1.2\%$ — Lineaire rekgrens

$\varepsilon r_{11;C;UD;TP;k} := \varepsilon r_{11;C;UD;TP;ks_{Verdeling}} = 1.22\%$ — Waargenomen rekgrens

### E-Gemiddelde waarde

$E_{11;C;UD;TP;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;C;UD;TP}, m_{x;E11;C;UD;TP}\right)$ — E-modulus Gemiddelde waarde

$m_{x;E11;C;UD;TP} = 25.617\ \textbf{\textit{GPa}}$

## 17. LP batch waardes voor Multi-druk

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;C;Multi;LP} := \text{length}\left(E_{11;C;Multi;LP}\right) = 5$ — Aantal samples

$m_{x;E11;C;Multi;LP} := \text{mean}\left(E_{11;C;Multi;LP}\right) = 10.4\ \textit{GPa}$ — Gemmidelde waarde

$m_{y;E11;C;Multi;LP} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;C;Multi;LP}}{\textit{GPa}}\right)}{n_{E11;C;Multi;LP}} = 2.3$ — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;C;Multi;LP} := \text{Stdev}\left(E_{11;C;Multi;LP}\right) = 1.63\ \textit{GPa}$ — Standaard afwijking

$V_{x;E11;C;Multi;LP} := \dfrac{s_{x;E11;C;Multi;LP}}{m_{x;E11;C;Multi;LP}} = 0.16$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;C;Multi;LP} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;C;Multi;LP}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.16$ — Log variatie

$k_{n;E11;C;Multi;LP} := k_{n_{n_{E11;C;Multi;LP}-1},\,V_x} = 1.8$ — Afwijking vanaf gemiddelde

### Karakteristieke waarden

$E_{11;C;Multi;LP;k} := E_{11;C;Multi;LP;ks_{Verdeling}} = 7.7\ \textit{GPa}$ — E-modulus

### E-Gemiddelde waarde

$E_{11;C;Multi;LP;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;C;Multi;LP}, m_{x;E11;C;Multi;LP}\right)$ — E - modulus gemiddelde waarde

## 18. TP batch waardes voor Multi-druk

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ — Verdeling van materiaaleigenschappen

$n_{E11;C;Multi;TP} := \text{length}\left(E_{11;C;Multi;TP}\right) = 6$ — Aantal samples

$m_{x;E11;C;Multi;TP} := \text{mean}\left(E_{11;C;Multi;TP}\right) = 10.5\ \textbf{GPa}$ — 10.5 — Gemmidelde waarde

$m_{x;\sigma 11;C;Multi;TP} := \text{mean}\left(\sigma_{11;C;Multi;TP}\right) = 172.167\ \textbf{MPa}$

$m_{x;\varepsilon 11;C;Multi;TP} := \text{mean}\left(\varepsilon_{11;C;Multi;TP}\right) = 1.57\%$

$m_{x;\varepsilon r 11;C;Multi;TP} := \text{mean}\left(\varepsilon r_{11;C;Multi;TP}\right) = 1.87\%$

$m_{y;E11;C;Multi;TP} := \dfrac{\sum \ln\left(\dfrac{E_{11;C;Multi;TP}}{\textbf{GPa}}\right)}{n_{E11;C;Multi;TP}} = 2.3$ — 2.3 — Log gemiddelde waarde

$s_{x;E11;C;Multi;TP} := \text{Stdev}\left(E_{11;C;Multi;TP}\right) = 2.4\ \textbf{GPa}$ — 2.4 — Standaard afwijking

$s_{x;\sigma 11;C;Multi;TP} := \text{Stdev}\left(\sigma_{11;C;Multi;TP}\right) = 37.87\ \textbf{MPa}$

$s_{x;\varepsilon 11;C;Multi;TP} := \text{Stdev}\left(\varepsilon_{11;C;Multi;TP}\right) = 0.15\%$

$s_{x;\varepsilon r 11;C;Multi;TP} := \text{Stdev}\left(\varepsilon r_{11;C;Multi;TP}\right) = 0.33\%$

$V_{x;E11;C;Multi;TP} := \dfrac{s_{x;E11;C;Multi;TP}}{m_{x;E11;C;Multi;TP}} = 0.23$ — Variatie coëfficient

$s_{y;E11;C;Multi;TP} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;E11;C;Multi;TP}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.23$ — Log variatie

$k_{n;E11;C;Multi;TP} := k_{n_{n_{E11;C;Multi;TP}-1},\,V_x} = 1.77$ — Afwijking vanaf gemiddelde

$$\sigma_{11;C;Multi;TP;ks} = \begin{bmatrix} 1.051 \cdot 10^8 \\ 1.146 \cdot 10^8 \end{bmatrix} \textbf{Pa}$$

## Karakteristieke waarden

$E_{11;C;Multi;TP;k} := E_{11;C;Multi;TP;k_n} = 6.8\ \textbf{GPa}$ — E-modulus

$\sigma_{11;C;Multi;TP;k} := \sigma_{11;C;Multi;TP;ks_{Verdeling}} = 114.6\ \boldsymbol{MPa}$ Spanningsgrens

$\varepsilon_{11;C;Multi;TP;k} := \varepsilon_{11;C;Multi;TP;ks_{Verdeling}} = 1.32\%$ Lineaire rekgrens

$\varepsilon r_{11;C;Multi;TP;k} := \varepsilon r_{11;C;Multi;TP;ks_{Verdeling}} = 1.35\%$ Waargenomen rekgrens

## E-Gemiddelde waarde

E for mean value

$E_{11;C;Multi;TP;ks} := \text{stack}\left(m_{x;E11;C;Multi;TP}, m_{x;E11;C;Multi;TP}\right)$ Voor EN1990 alles obv gemiddelde waarden

## 21. Gecorigeerde UD-trek waardes

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ Verdeling van materiaaleigenschappen

Gemeten resultaten Gemeten hoek vezels Gecorigeerde resultaat

$$E_{11;T;UD} = \begin{bmatrix} 33.3 \\ 35.7 \\ 31 \\ 30 \\ 25.7 \\ 24.3 \\ 30.1 \\ 27.9 \\ 26.8 \\ 25.2 \end{bmatrix} \textit{GPa} \qquad \alpha_{T;UD} = \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 4 \\ 3 \\ 3 \\ 4 \\ 1 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} ° \qquad E_{x;T;UD} := \frac{\overrightarrow{E_{11;T;UD}}}{\cos\left(\alpha_{T;UD}\right)^4} = \begin{bmatrix} 33.48 \\ 35.9 \\ 31.3 \\ 30.17 \\ 25.84 \\ 24.54 \\ 30.12 \\ 28.05 \\ 26.95 \\ 25.26 \end{bmatrix} \textit{GPa}$$

$n_{Ex;T;UD} := \text{length}\left(E_{x;T;UD}\right) = 10$ Aantal samples

$m_{x;Ex;T;UD} := \text{mean}\left(E_{x;T;UD}\right) = 29.2\ \textit{GPa}$ Gemmidelde waarde

$$m_{y;Ex;T;UD} := \frac{\sum \ln\left(\frac{E_{x;T;UD}}{\textit{GPa}}\right)}{n_{Ex;T;UD}} = 3.4$$ Log gemiddelde waarde

$s_{x;Ex;T;UD} := \text{Stdev}\left(E_{x;T;UD}\right) = 3.72\ \textit{GPa}$ Standaard afwijking

$$V_{x;Ex;T;UD} := \frac{s_{x;Ex;T;UD}}{m_{x;Ex;T;UD}} = 0.13$$ Variatie coëfficient

$$s_{y;Ex;T;UD} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;Ex;T;UD}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.13$$ Log variatie

$k_{n;Ex;T;UD} := k_{n_{Ex;T;UD}-1,\,V_x} = 1.72$ Afwijking vanaf gemiddelde

## Karakteristieke waarden

$E_{x;T;UD;k} := E_{x;T;UD;ks_{Verdeling}} = 23.3\ \textit{GPa}$ E-modulus

$\sigma_{x;T;UD;k} := \sigma_{x;T;UD;ks_{Verdeling}} = 391.5\ \textit{MPa}$ Spanningsgrens

$\varepsilon_{x;T;UD;k} := \varepsilon_{x;T;UD;ks_{Verdeling}} = 1.18\%$ Lineare rekgrens

## 22. Gecorigeerde UD-druk waardes

Materiaal eigenschappen genoemd als: [Eigenschap]$_{[as];[C/T];[UD/Multi](;[Paneel])}$

$V_{xs_{V_x}} = \text{“Bekend”}$ Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} = \text{“Lognormaal”}$ Verdeling van materiaaleigenschappen

Gemeten resultaten Gemeten hoek vezels Gecorigeerde resultaat

$$E_{11;C;UD} = \begin{bmatrix} 27 \\ 23.8 \\ 26.1 \\ 26.4 \\ 23.8 \\ 26.6 \\ 34.7 \\ 28.6 \\ 29 \\ 31.8 \\ 24.2 \end{bmatrix} \textit{GPa} \qquad \alpha_{C;UD} = \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \\ 1 \\ 3 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} ° \qquad E_{x;C;UD} := \frac{\overrightarrow{E_{11;C;UD}}}{\cos\left(\alpha_{C;UD}\right)^4} = \begin{bmatrix} 27.02 \\ 24.03 \\ 26.12 \\ 26.4 \\ 23.86 \\ 26.75 \\ 34.89 \\ 28.62 \\ 29.16 \\ 31.88 \\ 24.33 \end{bmatrix} \textit{GPa}$$

$n_{Ex;C;UD} := \text{length}\left(E_{x;C;UD}\right) = 11$ Aantal samples

$m_{x;Ex;C;UD} := \text{mean}\left(E_{x;C;UD}\right) = 27.5\ \textit{GPa}$ Gemmidelde waarde

$$m_{y;Ex;C;UD} := \frac{\sum \ln\left(\frac{E_{x;C;UD}}{\textit{GPa}}\right)}{n_{Ex;C;UD}} = 3.3$$ Log gemiddelde waarde

$s_{x;Ex;C;UD} := \text{Stdev}\left(E_{x;C;UD}\right) = 3.42\ \textit{GPa}$ Standaard afwijking

$$V_{x;Ex;C;UD} := \frac{s_{x;Ex;C;UD}}{m_{x;Ex;C;UD}} = 0.12$$ Variatie coëfficient

$$s_{y;Ex;C;UD} := \sqrt{\left(\ln\left(V_{x;Ex;C;UD}{}^2 + 1\right)\right)} = 0.12$$ Log variatie

$k_{n;Ex;C;UD} := k_{n_{n_{Ex;C;UD}-1},\,V_x} = 1.716$ Afwijking vanaf gemiddelde

## Karakterstieke waarden

$E_{x;C;UD;k} := E_{x;C;UD;ks_{Verdeling}} = 22.1\ \textit{GPa}$ E-modulus

$\sigma_{x;C;UD;k} := \sigma_{x;C;UD;ks_{Verdeling}} = 326.8\ \textit{MPa}$ Spanningsgrens

$\varepsilon_{x;C;UD;k} := \varepsilon_{x;C;UD;ks_{Verdeling}} = 1.14\%$ Lineare rekgrens

## Samenvatting

$V_{xs_{V_x}} =$ "Bekend" — Is variatie van materiaal bekend?

$Verdelingen_{Verdeling} =$ "Lognormaal" — Verdeling van materiaaleigenschappen

---

## Nominale waardes

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gecombineerd | 387.5 | 149.7 | 323.0 | 105.1 | Gecombineerd | 390.2 | 150.1 | 326.1 | 114.6 |

Lineaire rekgrens $\varepsilon_{11}$ [-]

| | Normaal | | | | | Lognormaal | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Trek | | Druk | | | Trek | | Druk | |
| | UD | Multi | UD | Multi | | UD | Multi | UD | Multi |
| LP | 1.39% | 0.00% | 0.98% | - | LP | 1.41% | 0.00% | 1.05% | - |
| TP | 1.11% | 1.02% | 1.18% | 1.31% | TP | 1.13% | 1.03% | 1.20% | 1.32% |
| Gecombineerd | 1.14% | 1.02% | 1.10% | 1.31% | Gecombineerd | 1.18% | 1.03% | 1.13% | 1.32% |

Waargenomen rekgrens $\varepsilon r_{11}$ [-]

| | Normaal | | | | | Lognormaal | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Trek | | Druk | | | Trek | | Druk | |
| | UD | Multi | UD | Multi | | UD | Multi | UD | Multi |
| LP | - | - | -3.69% | - | LP | - | - | 0.38% | - |
| TP | - | - | 1.21% | 1.28% | TP | - | - | 1.22% | 1.35% |
| Gecombineerd | - | - | -2.16% | 1.28% | Gecombineerd | - | - | 0.36% | 1.35% |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 1.14% | 2.0% | -43% |
| | 1.10% | 1.2% | -8% |
| | 1.02% | 1.4% | -27% |
| | 1.31% | 1.2% | 9% |

## Vergelijking voor vezelhoek gecorigeerde waardes

$$\Delta_{E;T;UD;\alpha} := \frac{E_{x;T;UD;k} - E_{11;T;UD;k}}{E_{11;T;UD;k}} = 0.57\% \qquad \Delta_{E;C;UD;\alpha} := \frac{E_{x;C;UD;k} - E_{11;C;UD;k}}{E_{11;C;UD;k}} = 0.36\%$$

$$\Delta_{\sigma;T;UD;\alpha} := \frac{\sigma_{x;T;UD;k} - \sigma_{11;T;UD;k}}{\sigma_{11;T;UD;k}} = 0.32\% \qquad \Delta_{\sigma;C;UD;\alpha} := \frac{\sigma_{x;C;UD;k} - \sigma_{11;C;UD;k}}{\sigma_{11;C;UD;k}} = 0.2\%$$

$$\Delta_{\varepsilon;T;UD;\alpha} := \frac{\varepsilon_{x;T;UD;k} - \varepsilon_{11;T;UD;k}}{\varepsilon_{11;T;UD;k}} = 0.3\% \qquad \Delta_{\varepsilon;C;UD;\alpha} := \frac{\varepsilon_{x;C;UD;k} - \varepsilon_{11;C;UD;k}}{\varepsilon_{11;C;UD;k}} = 0.23\%$$

## t-test voor correlatie verwachte waarden - testdata

Verwachte waarden voor rekgrens

$\varepsilon_{1;T;UD} := 2.0\%$ $\varepsilon_{1;C;UD} := 1.4\%$ $\varepsilon_{1;T;Multi} := 1.4\%$ $\varepsilon_{1;C;Multi} := 1.2\%$

t-waarden

$$t_{x;T;UD} := \frac{m_{y;\varepsilon x;T;UD} - \ln\left(\varepsilon_{1;T;UD}\right)}{\frac{s_{y;Ex;T;UD}}{\sqrt{n_{\varepsilon x;T;UD}}}} = -6.78 \qquad t_{11;T;Multi} := \frac{m_{y;\varepsilon 11;T;Multi} - \ln\left(\varepsilon_{1;T;Multi}\right)}{\frac{s_{y;E11;T;Multi}}{\sqrt{n_{\varepsilon 11;T;Multi}}}} = -3.1$$

$$t_{x;C;UD} := \frac{m_{y;\varepsilon x;C;UD} - \ln\left(\varepsilon_{1;C;UD}\right)}{\frac{s_{y;Ex;C;UD}}{\sqrt{n_{\varepsilon x;C;UD}}}} = 1 \qquad t_{11;C;Multi} := \frac{m_{y;\varepsilon 11;C;Multi} - \ln\left(\varepsilon_{1;C;Multi}\right)}{\frac{s_{y;E11;C;Multi}}{\sqrt{n_{\varepsilon 11;C;Multi}}}} = 3.4$$

$t_{crit} := 2.262$

$|t_{11;T;UD}| > t_{crit}$ & $|t_{11;C;UD}| > t_{crit}$

Dit betekend dat het resultaat statistisch significant is voor trek, niet voor druk.

## Materiaaleigenschappen laminaten coupontest - aanname

Directe vergelijking lameleigenschappen tussen coupontest en aangehouden waardes VO

| Mat | $E_{11}$ trek [GPa] | | | $E_{11}$ druk [GPa] | | | $\sigma_{11}$ trek [MPa] | | | $\sigma_{11}$ druk [ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Coup. testen | VO | Δ | Coup. testen | VO | Δ | Coup. testen | VO | Δ | Coup. testen | VO |
| LP-UD | 26.9 | 28.3 | -5.0% | 29.7 | 28.3 | 4.9% | 387.3 | 339.4 | 14.1% | 340.2 | 339.4 |
| TP-UD | 31.1 | 28.3 | 10.1% | 25.6 | 28.3 | -9.4% | 387.2 | 339.4 | 14.1% | 323.8 | 339.4 |
| LP-Multi | - | 11.82 | - | 10.4 | 11.82 | -12.4% | - | 141.9 | - | - | - |
| TP-Multi | 13.1 | 11.99 | 9.5% | 10.5 | 11.99 | -12.8% | 150.1 | 143.9 | 4.3% | 114.6 | 143.9 |

Verwerkte waardes laminaat stijfheid tussen coupontest en aangehouden waardes VO

| Matverdeling | | | $E_{11}$ trek [GPa] | | | $E_{11}$ druk [GPa] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | UD | Multi | Coupon testen | VO | Δ | Coupon testen | VO | Δ |
| LP | 85% | 15% | 22.8 | 22.9 | -0.3% | 26.8 | 22.9 | 16.9% |
| TP | 57% | 43% | 23.4 | 14.6 | 60.3% | 19.1 | 14.6 | 30.8% |

# Bijlage D –Rapporten materiaaltests




# Reefbrug project - Naming conventions of blade parts

Date: 08-06-2026
Version 1.1

TU Delft

# Contents


| | | |
|---|---|---|
| 1 | Introduction | 3 |
| 2 | Naming of sections and segments | 4 |
| 3 | Cutting of blade panels | 9 |
| 4 | Naming of blade panels | 11 |

# 1 Introduction

In the Reefbrug project, a bridge will be realised where two wind turbine blades form the main bridge girders. The third blade of the wind turbine is cut in pieces and is examined at the Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

To allow for clear reporting and communication regarding the different parts of the wind turbine blade that are inspected and tested, a naming convention is established for this project. This document provides an overview of the naming conventions used to identify and correctly orientate the cut parts of the wind turbine blade.

# 2 Naming of sections and segments

One wind turbine blade of 25.5 meters in length is split into 11 parts, so-called “segments”. One of these segments is the removable 4-m-long tip of the blade (Figure 1). The other 10 segments are created by cutting the blade into 2.19-m-long pieces (Figure 2).



*Figure 1: Removed tip*



*Figure 2: Blade cut in 10 segments*

The segments are each assigned a letter, from A to I. The segment at the circular end (i.e. the root-end) of the blade is labelled “ROOT”. The following one is labelled “A”, then “B”, “C”, “D”, “E”, “F”, “G”, “H” and “I”. The last segment is the removed tip, which is labelled “TIP” (Figure 3).

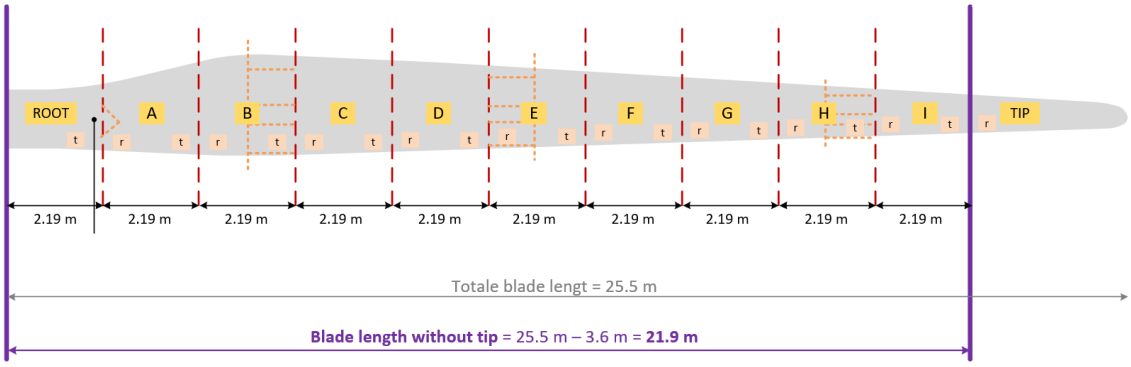



*Figure 3: Overview of the blade segments and lengths*

All segments have two cut ends, one at the root-direction and one at the tip direction. These cross sections are marked with “r” and “t” respectively. Note that for instance the “t”-section of segment B is identical to the “r”-section of segment C.
In future design reports of the Reefbrug, “cross section A” would refer to the “r”-section of segment A; “cross section B” to the “r”-section of segment B; and so on.

On site, all measurements of the “r”-sections have been tabulated (except for the TIP-segment).

Figure 4 to 14 show photographs of the cross sections.



*Figure 4: Section ROOT-r*



*Figure 5: Section ROOT-t (identical to A-r)*



*Figure 6: Section A-t (identical to B-r)*



*Figure 7: Section B-t (identical to C-r)*



*Figure 8: Section C-t (identical to D-r)*



*Figure 9: Section D-t (identical to E-r)*



*Figure 10: Section E-t (identical to F-r)*



*Figure 11: Section F-t (identical to G-r)*



*Figure 12: Section G-t (identical to H-r)*



*Figure 13: Section H-t (identical to I-r)*



*Figure 14: Section I-t (identical to TIP-r)*

# 3 Cutting of blade panels

Segments B, E and H are selected for further inspection. First, those blade segments are marked with a colour and symbol system, such that the individual panels can be identified after the blade segment has been cut in pieces. Each segment is about 2.19 m long, but segments B, E and H are cut in half, creating segments of about 1.09 m long. Next, segment B-t, E-r and H-t are cut into strips, co-called “panels”. Each panel is about 1.09 m long, while the width differs per panel.

Segment B and E are cut into 9 panels each: two spar caps, two shear webs, two parts of the leading edge, two trailing edge panels and the trailing edge (see Figure 15 and 16). For segment H a similar approach was used, but since the shear webs of segment H are very small, those cuts were not made. Segment H was therefore split into 6 parts: the central box (consisting of two spar caps and two shear webs), two parts of the leading edge, two trailing edge panels and the trailing edge (Figure 17). Furthermore, two triangles were cut from segment A-r (Figure 18).




*Figure 15: Cutting plan for segment B-t*




*Figure 16: Cutting plan for segment E-r*




*Figure 17: Cutting plan for segment H-t*




*Figure 18: Cutting plan for segment A-r*

# 4 Naming of blade panels

Figure 19 to 21 show the cut blade panels. Each panel is labelled. In yellow the panel type is indicated:

LP = Leading Edge Panel
SWL = Shear Web Left
SC = Spar Cap
SWR = Shear Web Right
TP = Trailing Edge Panel
TE = Trailing Edge

In blue, with letters “P” and “S”, distinction is made between both spar caps, both leading edge panels and both trailing edge panels. P refers to the pressure side of the blade, and S to the suction side of the blade.

To keep track of the orientation of the blade panels, letters ‘t’ and ‘r’ are again used to indicate the cross section at tip-side and root-side of the blade respectively.

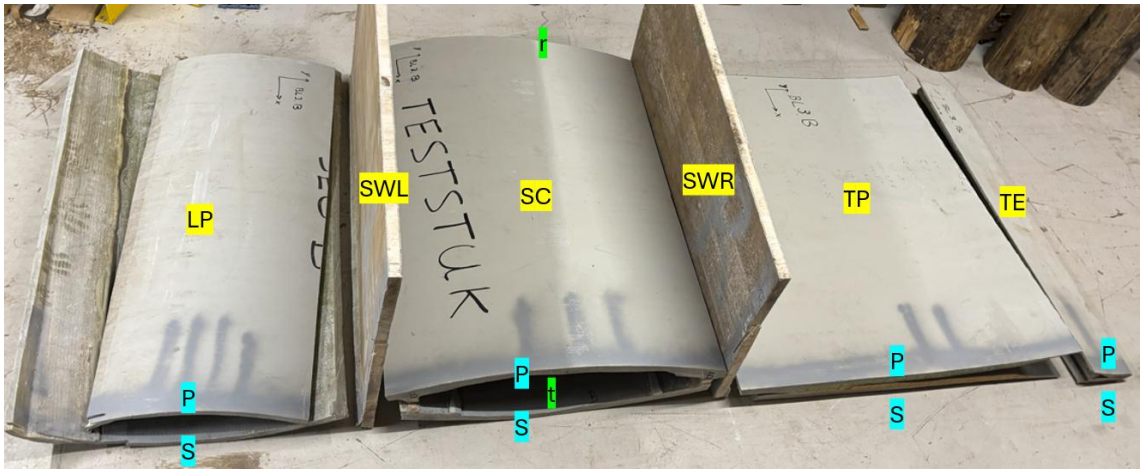



*Figure 19: Segment A cut into 9 panels.*

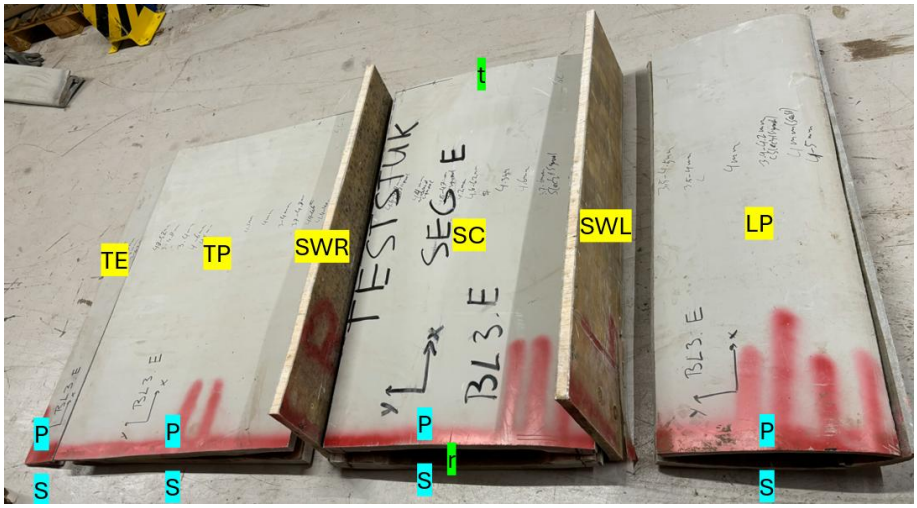



*Figure 20: Segment E cut into 9 panels*

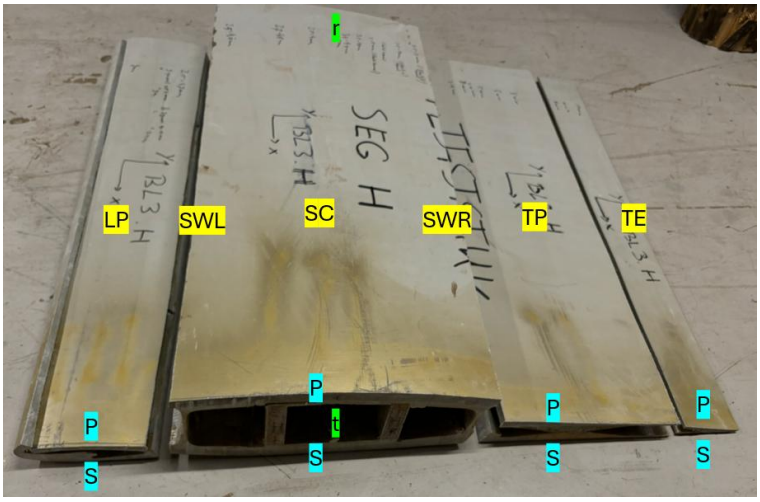



*Figure 21: Segment H cut into 6 pieces.*

Figure 22 shows a close up of panels H-TE and H-TP-S and their markings as an example.

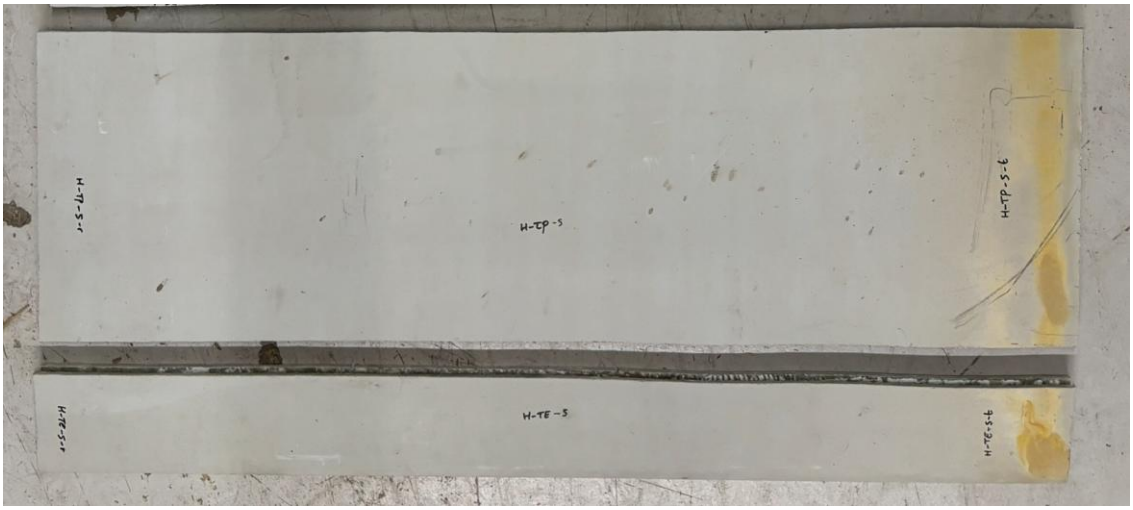


*Figure 22: Two panels labelled.*

The two triangles from segment A are labelled with SC (or ‘spar’) and LE:




*Figure 23: A-r of the blade.*

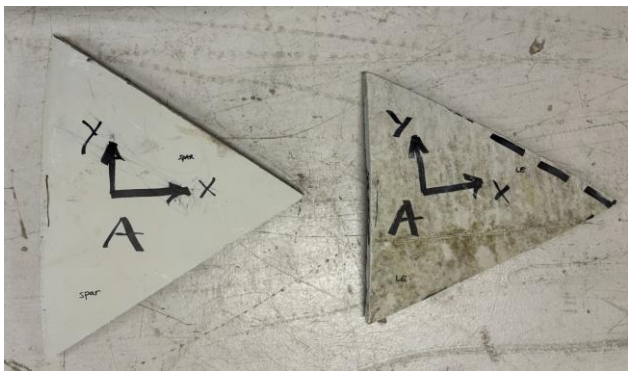



*Figure 24: two triangles from near the root of the blade*




# Reefbrug project – Burn-off test results

Date: 08-07-2026
Version 1.1

TU Delft

# Contents


**1 Introduction** **3**

**2 Specimen selection** **4**

**3 Approach** **5**
3.1 Hydrostatic weighing 5
3.2 Oven procedure 6

**4 Results** **7**
4.1 Lay-up 7
4.2 Densities and weights 10

**5 Conclusion and discussion** **12**

# 1 Introduction

In the Reefbrug project, a bridge will be realised where two wind turbine blades form the main bridge girders. The third blade of the wind turbine is cut in pieces and is examined at the Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

To determine the layup of the GFRP parts of the wind turbine blade, in total 26 burn-off tests were conducted on various parts of the blade. 24 locations were examined, with one sample per panel type, except for a spar cap panel where three samples were taken to help determine the fibre volume fractions. The goal is to determine the fibre orientation and fibre fraction of the various blade parts.

# 2 Specimen selection

Specimens for the burn-off tests were obtained from four blade segments: A, B, E and H. *Document "Reefbrug project - Naming conventions of blade parts" describes the naming conventions used.*

Segment B is the segment that is examined in most detail, as that segment contains the largest panels, making it the simplest to extract burn-off samples, and, in a later stage, coupons. One specimen from each panel around the perimeter on the tip-end ("t") of the segment was taken. The suction side spar cap of segment B was chosen as input for determining the fibre volume fractions, as spar caps are generally solid laminates without a glue, wood or foam layer, allowing for consistent results when determining the densities. In total, 13 specimens were obtained from segment B:

Segment B
- Leading edge – suction side (B-LE-S-t)
- Leading edge – pressure side (B-LE-P-t)
- Leading edge panel – suction side (B-LP-S-t)
- Leading edge panel – pressure side (B-LP-P-t)
- Spar cap – suction side (B-SC-S-t) - 3x
- Spar cap – pressure side (B-SC-P-t)
- Shear web left (B-SWL-t)
- Shear web right (B-SWR-t)
- Trailing edge panel – suction side (B-TP-S-t)
- Trailing edge panel – pressure side (B-TP-P-t)
- Trailing edge (B-TE-t)

For the other segments, only the pressure side was investigated, as results from segment B indicated no significant difference in layup between the pressure and suction side.
For segment A, E and H, the following panels were tested:

Segment A
- Leading edge – pressure side (A-LE-P-r)
- Spar cap – pressure side (A-SC-P-r)

Segment E
- Leading edge – pressure side (E-LE-P-t)
- Leading edge panel – pressure side (E-LP-P-r)
- Spar cap – pressure side (E-SC-P-r)
- Shear web left (E-SWL-r)
- Trailing edge panel – pressure side (E-TP-P-r)

Segment H
- Leading edge – pressure side (E-LE-P-t)
- Leading edge panel – pressure side (H-LP-P-t)
- Spar cap – pressure side (H-SC-P-t)
- Shear web right (H-SWR-t)
- Trailing edge panel – pressure side (H-TP-P-t)
- Trailing edge (B-TE-t)

# 3 Approach

Samples were extracted from the panels (Figure 1 and 2). The samples and corresponding panels were labelled and photographed.

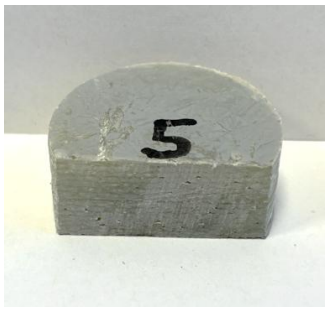



*Figure 1: One of the specimens*

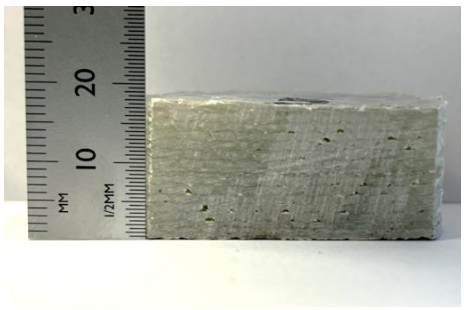



*Figure 2: Specimen side view*

The burn-off tests were conducted according to NEN-EN ISO 1172, but with a few changes. The standard describes the approach of determining the amount of glass in a composite material through calcination, meaning that the resin is burned off at high temperatures, while the glass is left behind.

The standard suggests using a specimen of 2 to 10 grams, but the specimens tested were in the range of 10 to 50 grams. This large specimen size was chosen to allow proper inspection of the lay-up, without causing instability of the specimen, given its large thickness. Another deviation from the standard was made regarding preparation of the crucibles, as new aluminium cups were used that did not require cleaning through pre-heating.

## 3.1 Hydrostatic weighing

The three specimens meant for confirming the fibre volume fraction (see Chapter 2) were weighed under water a week prior to the calcination. Weighing the specimens in air and under water is a commonly used method to determine a material's density. The specimens were left to dry for a week.

The following formulae were used to determine the density, where *a* is the weight of the specimen in air and *b* is the weight of the specimen under water:

$$sp\ gr\frac{t_a}{t_w} = \frac{a}{a-b} \tag{1}$$

$$M = \left|\frac{997.048 - 997.9948}{25 - 21}\right| \tag{2}$$

$$D\ (conversion\ t_w - 23) = sp\ gr\frac{t_a}{t_w} * (997.5412 + (t_w - 23) * M) \tag{3}$$

$$sp\ gr\frac{23}{23} = D\ (conversion\ t_w - 23)/997.5 \tag{4}$$

$$D^{23C} = sp\ gr\frac{23}{23}°C\ *997.5 \quad (5)$$

## 3.2 Oven procedure

Before every calcination, the empty crucible and specimen were weighed to determine their initial masses. The specimen was then put in an oven at room temperature, and the target temperature was manually increased with steps of 50 degrees Celsius to be able to control the smoke production. The burn-off test was then carried out at a maximum temperature of 565 degrees Celsius for between 3 and 9 hours, depending on the specimen size.

After the resin was fully burned off, the specimen was taken out of the oven and left to cool. It was then weighed again, together with the crucible (Figure 4).




*Figure 4: Specimen after calcination*

# 4 Results

The burn-off tests provide insight in the lay-up and in the fibre fractions on the blade panels.

## 4.1 Lay-up

After weighing the calcinated specimen, the glass fibre layers were pealed back layer by layer with tweezers and laid out on a dark background. Figure 5 shows one of the samples, laid out in layers, from left to right, from top to bottom. On the top left, the thin white coating of the blade can be seen. Right to that are respectively a Chopped Strand Mat (CSM), a +/-45 fabric, a 0/90 fabric, another CSM and a unidirectional (UD) fabric. It was found that every UD fabric has a thin multiaxial fabric underneath, with a mass less than 10% of the UD fabric (see also Section 4.2).

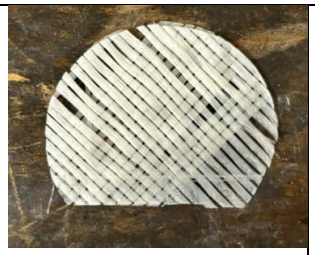
Figure 5 also shows a UD glass fibre layer that seems to be incomplete (on the right side of the image). This phenomenon was found for several specimens, indicating that these samples were taken on the edge of a glass fibre mat. Since the laminate thicknesses change around the perimeter of the blade, it is logical that there will be some steps in the glass fabrics to achieve this thickness change.



*Figure 5: Lay-up of one of the samples*

The table below provides an overview of the different fabrics found in the blade. The four main types of fabric are UD, +/- 45, 0/90 and CSM. Two types of CSM were found: one where the fibres after calcination were very loose (here referred to as “Type 1”) and one where the fibres after calcination were firmly packed together and patterned (here referred to as “Type 2”).

*Table 1: Overview of fabric types*

| | | |
|---|---|---|
|  Thick UD fabric (left) with a thin multiaxial fabric underneath (right) |  +/-45 fabric |  Chopped Strand Mat (CSM) – type 1 |
|  Coating |  0/90 fabric |  Chopped Strand Mat (CSM) – type 2 |

The layup of the 24 samples is revealed in the table below. Note that the sample from the trailing edge (TE) of segment B is split in two parts, a top and a bottom part, because the trailing edge consists of two shells bonded together. In the figure, a dot means that a thick layer of adhesive, foam or wood was present there, which nearly fully burned off, leaving just some ashes.

*Table 2: Lay-up of the specimens*

| Specimen | fmf | fvf | adhesive layer in sample? | Layup | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A-LE-P-r | 0,58 | 0,38 | n | coating | CSM | 0/90 | CSM | ±45 | 0/90 | 0/90 | CSM | [0-mat]5 | 0/90 | CSM | [0-mat]5 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-LE-S-t | 0,44 | 0,26 | y | coating | CSM | 0/90 | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]3 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | . | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | | | | | | |
| B-LE-P-t | 0,49 | 0,30 | n | coating | CSM | 0/90 | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]2 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | | | | | | | | | | | |
| E-LE-P-r | 0,46 | 0,27 | n | coating | CSM | 0/90 | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]2 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | | |
| H-LE-P-t | 0,48 | 0,29 | n | coating | CSM | CSM | 0/90 | CSM | ±45 | CSM | 0/90 | CSM | [0-mat]3 | 0/90 | CSM | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-LP-P-t | 0,59 | 0,38 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]5 | 0/90 | CSM | [0-mat]5 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-LP-S-t | 0,56 | 0,36 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]5 | 0/90 | CSM | [0-mat]3 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E-LP-P-r | 0,58 | 0,38 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]5 | 0/90 | CSM | [0-mat]4 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H-LP-P-t | 0,56 | 0,36 | n | coating | CSM | 0/90 | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]8 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-SC-P-r | 0,61 | 0,41 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]9 | 0/90 | CSM | [0-mat]8 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-SC-P-t | 0,61 | 0,41 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]10 | 0/90 | CSM | [0-mat]8 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-SC-S-t_1 | 0,55 | 0,35 | n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-SC-S-t_2 | 0,56 | 0,36 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]5 | 0/90 | CSM | [0-mat]6 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-SC-S-t_3 | 0,56 | 0,36 | n | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E-SC-P-r | 0,58 | 0,38 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]10 | 0/90 | CSM | [0-mat]10 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H-SC-P-t | 0,62 | 0,41 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]14 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-SWL-t-inside | 0,58 | 0,38 | n | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | . | thin 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-SWR-t-inside | 0,60 | 0,40 | n | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | . | thin 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E-SWL-r-outside | 0,60 | 0,40 | n | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | thin 0/90 | . | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H-SWR-t-outside | 0,51 | 0,32 | y | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | CSM | 0/90 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | CSM | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-TP-P-t | 0,48 | 0,29 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | [0-mat]2 | 0/90 | CSM | CSM | thin 0/90 | . | CSM | 0/90 | 0/90 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-TP-S-t | 0,50 | 0,30 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | [0-mat]3 | 0/90 | CSM | . | CSM | CSM | 0/90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E-TP-P-r | 0,48 | 0,29 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | [0-mat]2 | 0/90 | CSM | thin 0/90 | . | CSM | 0/90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H-TP-P-t | 0,51 | 0,32 | n | coating | CSM | ±45 | 0/90 | CSM | [0-mat]6 | 0/90 | CSM | thin 0/90 | . | CSM | CSM | 0/90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B-TE-P-t-(top) | 0,48 | 0,29 | y | coating | CSM | [0/90]8 | ±45 | ±45 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | | | | | | | | | | | |
| B-TE-P-t-(bottom) | 0,48 | 0,29 | y | coating | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | . | CSM | 0/90 | CSM | 0/90 | ±45 | ±45 | [0/90]10 | CSM | CSM | | | | | | | |
| H-TE-P-t | 0,38 | 0,21 | y | coating | CSM | 0/90 | ±45 | 0/90 | CSM | 0/90 | CSM | . | CSM | 0/90 | ±45 | 0/90 | CSM | coating | | | | | | | | | | | | | | | | | |

fmf = fibre mass fraction
fvf = fibre volume fraction
y = yes
n = no

## 4.2 Densities and weights

Table 2 also contains the fibre mass fractions (fmf) of the glass in composite, calculated by dividing the mass of the specimen after burning by the initial mass. Note that the three specimens of B-SC-S-t give similar results – namely a fibre mass fraction of 0.55, 0.56 and 0.56 – confirming the precision of the testing approach.

The fibre mass fractions $M_f$ are converted to fibre volume fractions $V_f$ based on an assumed fibre density of $\rho_f$ = 2600 kg/m$^3$ and a resin density of $\rho_m$ = 1150 kg/m$^3$. The following formula is used for this conversion (from CUR-96):

$$V_f = \frac{1}{1 + \frac{\rho_f}{\rho_m} \cdot \left(\frac{1}{M_f - 1}\right)}$$

To verify the assumed densities of the glass and resin, some specimens were subjected to hydrostatic weighing (underwater weighing, see Section 3.1), prior to calcination, to determine the densities of the laminate. This was done for three specimens taken from the B-SC-S-t blade panel.

Table 3 shows the calculation of the fibre volume fraction for these specimens, based on an assumed fibre density $\rho_f$ of 2600 kg/m$^3$ and the underwater weighing. This leads to an average fibre volume fraction of 0.35. In Table 2, the calculated average using a fibre density of $\rho_f$ = 2600 kg/m$^3$ and a resin density of $\rho_m$ = 1150 kg/m$^3$ was 0.36. This confirms that the assumed values for the glass and resin density are appropriate.

*Table 3: Fibre volume fraction calculation based on hydrostatic weighing*

| | t [mm] | **m_before burning [g]** | **m_after burning [g]** | m_air [g] | T_water [C] | m_under-water [g] | fibre density assumed | specific gravity | density [kg/m3] | specific gravity converted to 23 C | **Fibre mass fraction** | **Fibre volume fraction** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B-SC-S-t-#1 | 19.78 | 33.2232 | 18.2264 | 33.24 | 17.53 | 12.80 | 2600 | 1.626 | 1620.9 | 1.625 | 0.55 | **0.34** |
| B-SC-S-t-#2 | 18.85 | 31.2128 | 17.3569 | 32.21 | 17.53 | 12.07 | 2600 | 1.599 | 1594.1 | 1.598 | 0.56 | **0.34** |
| B-SC-S-t-#3 | 21.77~ 25.80 | 39.4335 | 22.2313 | 39.44 | 17.53 | 15.32* | 2600 | 1.635 | 1629.8 | 1.634 | 0.56 | **0.35** |

** = mass dropped by 0.50 g during submerging*

Finally, some of the fabrics after calcination were weighted individually (see Table 3). Using the estimated area of the specimen (Figure 7), the mass per m$^2$ can be calculated. The mass found for the UD fabrics (“ 0 ”) is very consistent, around 1200 g/m$^2$, confirming the precision of the test procedure.

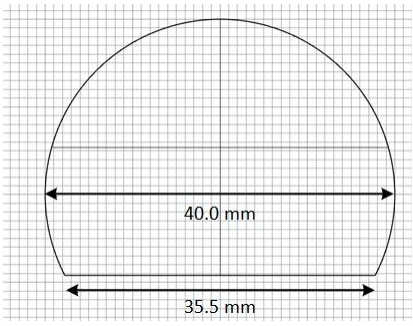



*Figure 7: Geometry of specimen B-SC-S-t*

*Table 4: Mass found for individual fabrics*

| **Specimen "B-SC-S-t"** | m_fibers [g] | area sample (*calculated based on Figure 7*) [mm$^2$] | Mass [g/m$^2$] | Average [g/m2] |
|---|---|---|---|---|
| Mat top – type 1 | 0.4150 | 983 | 422 | |
| " +/-45 " | 0.4110 | 983 | 418 | |
| " 0/90 " | 0.6197 | 983 | 630 | |
| Mat – type 2 | 0.2338 | 983 | 238 | |
| " 0 " #1 | 1.1934 | 983 | 1214 | |
| " 0 " #2 | 1.1327 | 983 | 1152 | 1198 |
| " 0 " #3 | 1.2076 | 983 | 1228 | |
| Tiny 0/90 mat under "0" #1 | 0.1257 | 983 | 128 | |
| Tiny 0/90 mat under "0" #2 | 0.0971 | 983 | 99 | 123 |
| Tiny 0/90 mat under "0" #3 | 0.1396 | 983 | 142 | |
| Mat bottom – type 1 | 0.3770 | 983 | 384 | |

# 5 Conclusion and discussion

To investigate the build-up of a used wind turbine blade made mainly of glass-fibre reinforced polymer (GFRP) composite, 26 burn-off tests were conducted. These burn-off tests provide insight in the material composition of various parts of the blade by analysing the stacking sequence of the fabrics and the fibre volume fractions.

Several patterns can be found in the lay-up of the wind turbine blade. In general, specimens taken from the perimeter of the blade from the leading edge panel (LP) until the trailing edge panel (TP) show the same architecture: the outer part right underneath the gelcoat is multidirectional and is built up of a combination of 0/90, ±45 and CSM fabrics. The other outer part, closest to the hollow inside of the blade, is thinner and is generally built up of just one layer of 0/90 and CSM. The inner part, in between both outer parts, mostly contains unidirectional (UD) fibres, orientated parallel to the central blade axis. Every layer of UD is accompanied by a thin multiaxial fabric, with a mass less than 10% of the UD fabric. Also, it was found that for some of these UD-dominated inner parts, especially in the spar caps, one layer of 0/90 and CSM was present about halfway through the thickness of the panel.

The burn-off tests show consistency in lay-up and fibre volume fraction between panels from the suction and pressure side of the blade. Also, the tests show consistency in lay-up and fibre volume fraction between the same panel types taken from different segments, for instance for the leading edge panels from segment B and E. However, slight deviations in lay-up towards the root-end (segment A) and tip-end of the blade (segment H) were found.

The fibre volume fraction for each specimen was calculated based on an assumed density for the resin and glass fibre. To verify these assumed densities, hydrostatic weighing was done for three spar cap specimens. The spar caps, consisting predominantly of UD fibres, were found to have fibre volume fractions between 0.35 and 0.41, which is slightly low. Upon close inspection of the specimens, it could be seen that each UD bundle is surrounded by a thin resin layer, confirming that the material is resin rich. On the other hand, the blade panels were found to be quite thick, with burn-off specimens up to 28 mm thick, which means that the panel as a whole still has a great amount of glass fibre.

Other panel types were found to have similar fibre volume fractions as the spar caps, where panels that are UD dominated (like the leading edge panels) have values of around 0.35 – 0.40, while multidirectional dominated panels (like the trailing edge panels) have values of around 0.30. It must be noted that panels with a thick adhesive layer, such as leading edge samples taken at the bond line, indicate much lower values for the fibre volume fraction than is actually the case for the laminate itself. This is caused by the presence of the adhesive, which fully burned off during testing, resulting in a large mass difference before and after weighing.

Overall, it can be concluded that many consistencies were found in both the lay-up and in the fibre volume fractions, providing a solid foundation for recreating a structural blade model to ultimately reuse these wind turbine blades as main bridge girders.




# Reefbrug project – Coupon tests – preliminary design phase

Date: 20-08-2026
Version 3.0

TU Delft

# Contents


**1 Introduction** **3**

**2 Approach** **4**
2.1 Testing specimens 4
2.2 Test set-up 6
2.3 Measurements 6

**3 Results** **7**
3.1 Number of specimens 7
3.2 Results tension tests 7
3.3 Results compression tests 10

**4 Conclusion and discussion** **12**

**Appendix A: Test data graphs** **13**

**Appendix B: Test data tables** **17**

**Appendix C: Test data “multi_LP_1”** **19**

# 1 Introduction

In the Reefbrug project, a bridge will be realised where two wind turbine blades form the main bridge girders. The third blade of the wind turbine is cut in pieces and is examined at the Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

Static tension and compression tests are an essential part of the experimental program to study the material properties of the glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite. The testing objective is to investigate the tensile and compressive behaviour – especially the stiffness and the ultimate capacity (load and strain at failure) – of coupons taken from the wind turbine blade. In the preliminary design phase of the project, 21 valid tensile tests and 22 valid compression tests are obtained. Different locations along the blade have been selected that are relevant for the blade acting as main girder in the bridge structure and further development steps in the project.

# 2 Approach

This chapter presents an overview of the testing approach.

## 2.1 Testing specimens

The test specimens consist of GFRP laminates in the shape of regular tensile Type 4 coupons following NEN-EN-ISO 527 (Figure 1) and compression coupons following NEN-EN-ISO 14126 (Figure 2), obtained by waterjet cutting them out of panels obtained from the wind turbine blade. The coupons are then also separated across their thickness, such that two types of coupons are obtained: one with a multidirectional layup (a combination of chopped strand mats, 0/90 and +45/-45 fabrics) and one with a predominantly unidirectional (UD) layup. The result is that these untabbed specimens have similar lengths and widths but varying thicknesses.

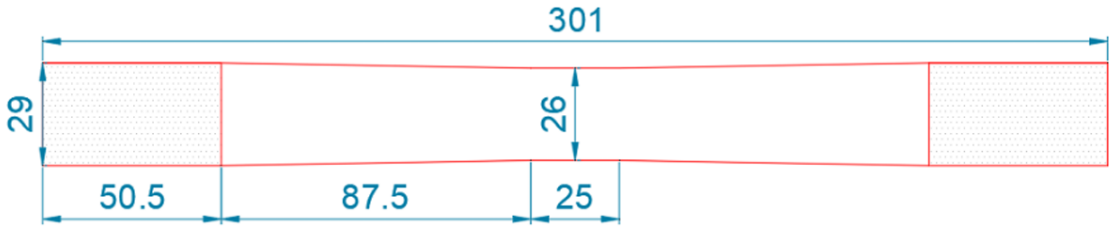



*Figure 1: Tension coupon cutting drawing with <0.5 mm tolerance. Dimensions in mm.*




*Figure 2: Compression coupon cutting drawing with <0.5 mm tolerance. Dimensions in mm.*

Figure 3 shows one of the tension coupons and Figure 4 shows one of the compression coupons.



*Figure 3: Obtained tension coupon*



*Figure 4: Obtained compression coupon*

The tapered tension coupon design is traditionally used for coupons with a multidirectional layup. The choice was made to now also use this design for coupons with a predominantly unidirectional (UD) layup. This is done to get more accurate stress estimates, as the measured width of a tapered coupon is closer to the “effective” cross section than when a straight coupon is measured, in the case that the coupon has a slight fibre misalignment to the direction of loading. This visualised in Figure 5.

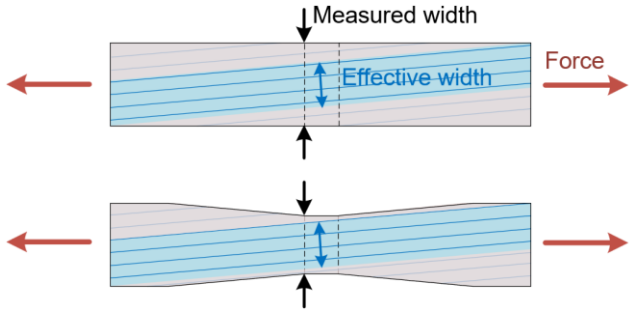



*Figure 5: Unidirectional coupon with fibre misalignment, straight (top) and tapered (bottom), exaggerated*

Coupons from two types of panels from the wind turbine blade are tested: the leading-edge panel of the midsegment of the blade (“E-LP-P”) and the trailing-edge panel of the midsection of the blade (“E-TP-P”). These are shown in Figure 6. It can be seen that at the top edge of both panels, close to the cutouts of the coupons, a semicircular cutout is visible, which is where the specimen for the burn-off test was taken (see *Report Reefbrug 2 - Burn-off test results).*
All coupons are taken from the blade in the longitudinal direction, i.e. parallel to the central blade axis. In the next design phase, more coupons will be tested, from other parts of the blade, as well as in the perpendicular direction.



*Figure 6: Blade panels after waterjet cutting*

## 2.2 Test set-up

The coupons are tested in a 600 kN Schenck PLX0004 test machine. Serrated grips are used and the gripping distance is 60 mm, which provided sufficient gripping surface and roughness to prevent crushing and slipping of the specimen. The tests were conducted at room temperature.

For the tensile tests, a testing speed of 2 mm/min is used. For the compression tests, a speed of 1 mm/min is used. All tests are performed displacement controlled.

## 2.3 Measurements

To evaluate the behaviour of specimen, the measurement includes:

- Monitoring the force-stroke curve of the machine during testing;
- Monitoring the elongation using an extensometer – for tension tests;
- Monitoring of the strains on the surface using a digital image correlation (DIC) – for compression tests.

An Instron extensometer is used for the tensile tests with a gauge length of 25 mm.
For the compression coupons, a black and white speckle pattern is applied to the side of the specimen to enable accurate tracking. By monitoring the side of the specimen, the out-of-plane deflections can be tracked to verify whether the deflections are within the allowed limits. During the test, photos of the side of the specimen were taken at a regular interval, and after the test, these photos were processed with the ZEISS CORRELATE software to create displacement curves. These are used to calculate the stiffness of the specimen and the strain at failure.

# 3 Results

This chapter summarizes the results of the conducted coupon tests.

## 3.1 Number of specimens

In total, around 75 coupons were tested, of which 43 tests were valid. The main reason for the high number of invalid tests is failure of the specimen inside the grips, most likely because of the surface roughness and slightly varying thickness over the width of the samples, causing uneven clamping forces in the grips. Also, it was noticed that specimens with a predominantly unidirectional layup had a minor fibre misalignment relative to the coupon direction, ranging from 0 to 4 degrees. In some cases, this resulted in premature longitudinal splitting of the coupon.

In total the following number of valid test results were obtained between 26-03-2026 and 02-04-2026:

- 11 coupons: tension – E-TP-P – multidirectional;
- 5 coupons: tension – E-TP-P – unidirectional;
- 5 coupons: tension – E-LP-P – unidirectional;
- 6 coupons: compression – E-TP-P – multidirectional;
- 6 coupons: compression – E-TP-P – unidirectional;
- 5 coupons: compression – E-LP-P – multidirectional;
- 5 coupons: compression – E-LP-P – unidirectional;

*Document "Report Reefbrug 1 - Naming conventions of blade parts" describes the naming conventions used.*

## 3.2 Results tension tests

Table 1 presents an overview of the tensile test data, where the stiffness is obtained using the extensometer data. The coefficient of variation $V_X$ is calculated for each property by dividing the standard deviation $s$ over the mean value $\bar{x}$.

The specimens are grouped by panel of origin and by material ID. The material ID represents the type of material that the specimen is composed of, where "multi_TP_1" represents the outer layer of the blade's outer skin consisting of multidirectional fabrics, "multi_TP_2" represents the inner layer of the blade's outer skin consisting of multidirectional fabrics, and "UD" represents the predominantly unidirectional fabrics found throughout the blade. The strength of the coupon is taken at the point of where the highest force is reached during the test.

*Table 1: Results tension tests*

| **Tension** | | | Young's modulus $E_{11}$ | | | Strength $\sigma_{11}$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Panel | Material ID | n | $\bar{x}$ [GPa] | $s$ [GPa] | $V_X$ [-] | $\bar{x}$ [MPa] | $s$ [MPa] | $V_X$ [-] |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 6 | 13.1 | 1.1 | 0.09 | 164 | 8 | 0.05 |
| | multi_TP_2 | 5 | 9.2 | 0.5 | 0.05 | 141 | 17 | 0.12 |
| | UD | 5 | 31.1 | 3.7 | 0.12 | 438 | 29 | 0.07 |
| E-LP-P-r | UD | 5 | 26.9 | 2.3 | 0.09 | 455 | 40 | 0.09 |

The reason for the magnitude of spread in the results, up to 12%, could be related to more than just variations in material properties. Most likely, part of the spread for the multidirectional coupons can be attributed to slight differences in composition, where for example one coupon has slightly more chopped strand mat than another coupon. For the unidirectional coupons, slight variations in fibre alignment can have contributed to the spread. Furthermore, variations in surface roughness of the coupons are likely to have affected the results.

The tension tests were instrumented with an extensometer, and this extensometer was used to measure the strains of the specimen during the test. Unfortunately, at large strains, well past the 0.05%-to-0.25% strain region needed for calculating the Young's modulus, the extensometer in most cases started slipping. This was mainly due to insufficient fixation of the extensometer to the specimen and failure of individual fibres on the outside of the coupon, leading to a sudden vibration in the extensometer. This would cause it to lose contact with the specimen for an instance. From the point that contact is lost, reliable extensometer data acquisition is lost, which is why no accurate data for the strain at failure was recorded.

Figure 7 shows the stress-strain curves for two representative tensile coupons, where the extensometer data in the graph is cut off from the point that the extensometer started slipping. For reference, the complete stress-strain curve based on the machine's grip displacement is added in Figure 7 as well. The reason why the complete curve is not used to directly quantify strain at failure, has to do with the slightly tapered shape of the coupon (see also Figure 1 and 5), which makes the strain distribution of the entire coupon difficult to relate to that of just the gauge length. Also, during the test, the outer parts of the UD coupon would start to separate, thus gradually lowering the stiffness of the coupon, while the "effective" cross section in the gauged area would remain to act near-linear. This explains the why for the UD coupon in Figure 7, the extensometer data shows a near-linear trend for the extensometer-based data and a decreasing slope for the grip-based estimate. The strain at failure of the UD coupons based on the grip displacement is therefore likely an overestimate and is thus not recorded.

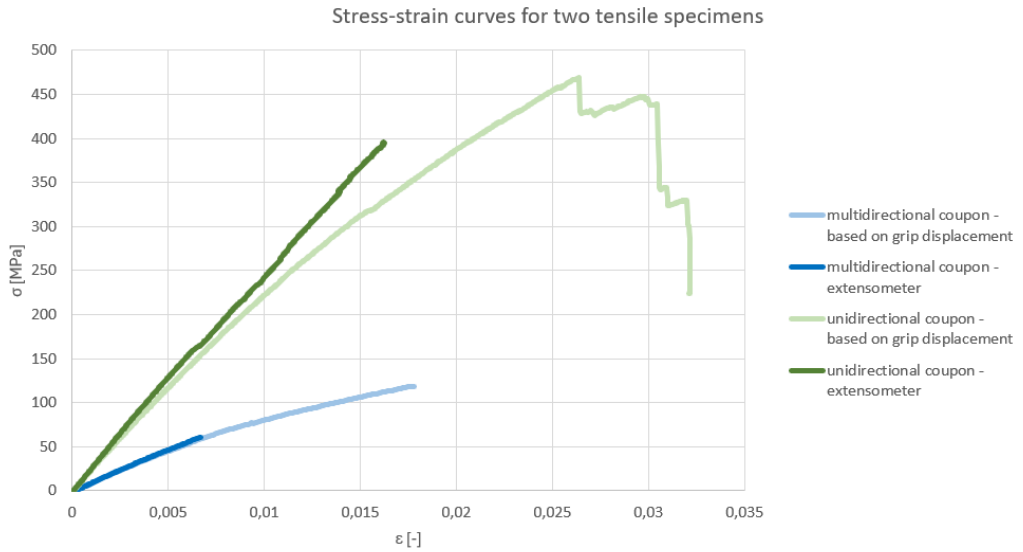



*Figure 7: Stress-strain curve for a tensile multidirectional and unidirectional specimen*

To enable linear elastic calculations based on strain criteria, for each test, the linearised strain at failure is calculated by dividing the strength ($\sigma_{11}$) over the stiffness ($E_{11}$) obtained from the extensometer data. The combined results are provided in Table 2. Again, the coefficient of variation $V_X$ is calculated for each property by dividing the standard deviation $s$ over the mean value $\bar{x}$.

*Table 2: Tension tests linearised strains*

| **Tension** | | | Linear strain at failure, calculated | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Panel | Material ID | n | $\bar{x}$ [-] | $s$ [-] | $V_X$ [-] |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 6 | 0.0126 | 0.0014 | 0.11 |
| | multi_TP_2 | 5 | 0.0152 | 0.0012 | 0.08 |
| | UD | 5 | 0.0137 | 0.0015 | 0.11 |
| E-LP-P-r | UD | 5 | 0.0170 | 0.0017 | 0.10 |

## 3.3 Results compression tests

Table 3 presents an overview of the compression test data. Again, the specimens are grouped by panel of origin and by material ID. It can be noticed that the stiffness of the specimens is similar to that of the tensile specimens. For the thin outer skin of the leading-edge panel (material ID "multi_LP_1"), no meaningful strength and strain at failure is found, because these coupons were too thin and buckled during testing. It must also be noted that the multidirectional coupons are composed of a combination of chopped strand mats, 0/90 and 45/-45 fabrics, but the layup is not symmetrical. This causes an asymmetric stress distribution in the coupons, making them more prone to buckling.

*Table 3: Results compression tests*

| **Compression** | | | Young's modulus $E_{11}$ | | | Strength $\sigma_{11}$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Panel | Material ID | n | $\bar{x}$ [GPa] | $s$ [GPa] | $V_X$ [-] | $\bar{x}$ [MPa] | $s$ [MPa] | $V_X$ [-] |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 6 | 10.4 | 2.4 | 0.23 | 172 | 38 | 0.22 |
| | UD | 6 | 25.6 | 1.4 | 0.06 | 364 | 24 | 0.07 |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 5 | 10.4 | 1.7 | 0.16 | - | - | - |
| | UD | 5 | 29.6 | 3.9 | 0.13 | 399 | 35 | 0.09 |

Similar to the tensile coupons, it is likely that the magnitude in spread of results is related to more than just variations in material properties. The spread in strength values for the multidirectional coupons tested in compression is even larger than that of the tensile tests, which might be explained by the asymmetry in coupon composition. Also, when specimens are tested in compression instead of tension, they are even more vulnerable for imperfections from coupon preparation.

Figure 8 shows the stress-strain curves for two representative compression coupons, based on the DIC data. Each point in the graph corresponds to a picture taken during the test. The data in the graph is cut off when the specimens failed.

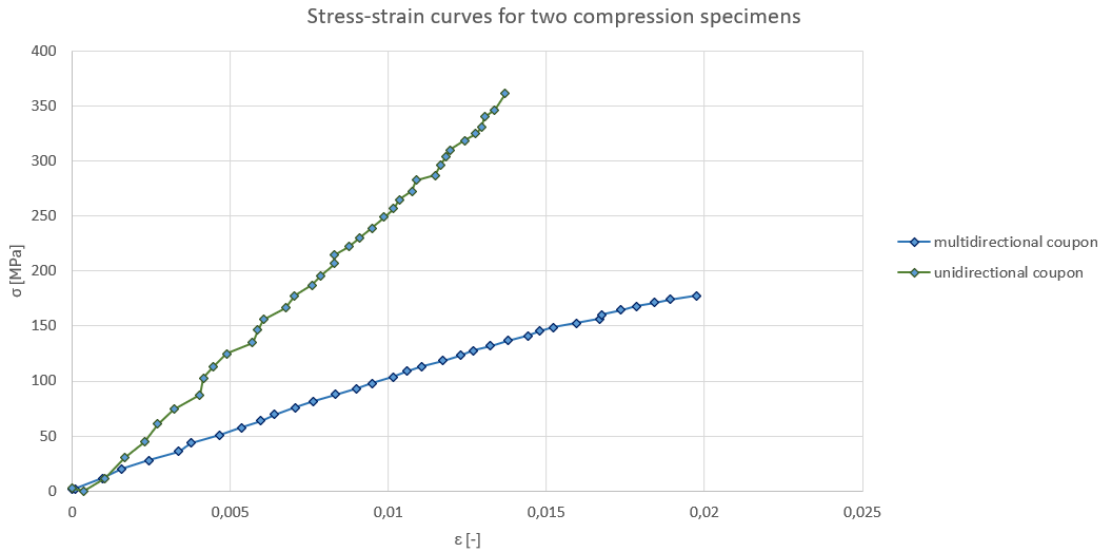



*Figure 8: Stress-strain curve for a compression multidirectional and unidirectional specimen*

Using the DIC data, the strain at failure was recorded. This is presented in Table 4. To enable linear elastic calculations based on strain criteria, for each test, the linearised strain at failure is calculated by dividing the strength ($\sigma_{11}$) over the stiffness ($E_{11}$) obtained from the DIC data. The combined results are provided in Table 4.

By comparing the recorded strain at failure with the linear strain at failure, it can be seen that the UD coupons act near-linear, while the multidirectional coupons exhibit some non-linearity.

*Table 4: Compression tests: measured strain at failure and linearised strain at failure*

| **Compression** | | | Strain at failure $\varepsilon_M$, recorded | | | Linear strain at failure, calculated | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Panel | Material ID | n | $\bar{x}$ [-] | $s$ [-] | $V_X$ [-] | $\bar{x}$ [-] | $s$ [-] | $V_X$ [-] |
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 6 | 0.0187 | 0.0033 | 0.18 | 0.0165 | 0.0014 | 0.09 |
| | UD | 6 | 0.0146 | 0.0014 | 0.10 | 0.0143 | 0.0014 | 0.10 |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 5 | - | - | - | - | - | - |
| | UD | 5 | 0.0135 | 0.0027 | 0.20 | 0.0137 | 0.0022 | 0.16 |

# 4 Conclusion and discussion

As a preliminary investigation of the material properties of a used wind turbine blade, glass-fibre reinforced polymer (GFRP) composite coupons are extracted from two parts of the blade – a leading edge panel and a trailing edge panel – which were then tested in tension or compression. This gives a first insight in the remaining strength, stiffness and strain at failure of the material, which is needed as input for the structural modelling of the blades when repurposed as bridge girders.

The choice was made to prepare the coupons such that they would contain either only a combination CSM, +45/-45 and 0/90 fabrics (“multidirectional” coupons) or only a predominantly unidirectional layup (“unidirectional” coupons). This gives insight in the individual material properties, which can later be combined in one structural model of the blade and its panels with appropriate thickness ratios.

The tension tests show that the material has great strength and stiffness, with the tensile strength of UD coupons averaging up to 455 MPa and the stiffness averaging up to 31 GPa. The spread in results for the tensile tests properties was found to be around 9% on average, with 12% at most. It is likely that the magnitude of the spread is related to more than just variations in material properties, as slight differences in coupon composition, slight variations in fibre alignment and variations in surface roughness are likely to have affected the results.

The compression tests also indicate significant strength and stiffness, although the strength is slightly less than that found in the tensile tests. The stiffness of the UD averages up to 30 GPa, which is similar to that of the tensile tests, while the highest strength property found averages 399 MPa. The spread in results in the compression tests was found to be higher than that in the tension tests, with a spread of up to 23%. The larger spread for the multidirectional coupons might be explained by the asymmetry in coupon composition. The compression coupons also seem more vulnerable for imperfections originating from coupon preparation than the tension coupons.

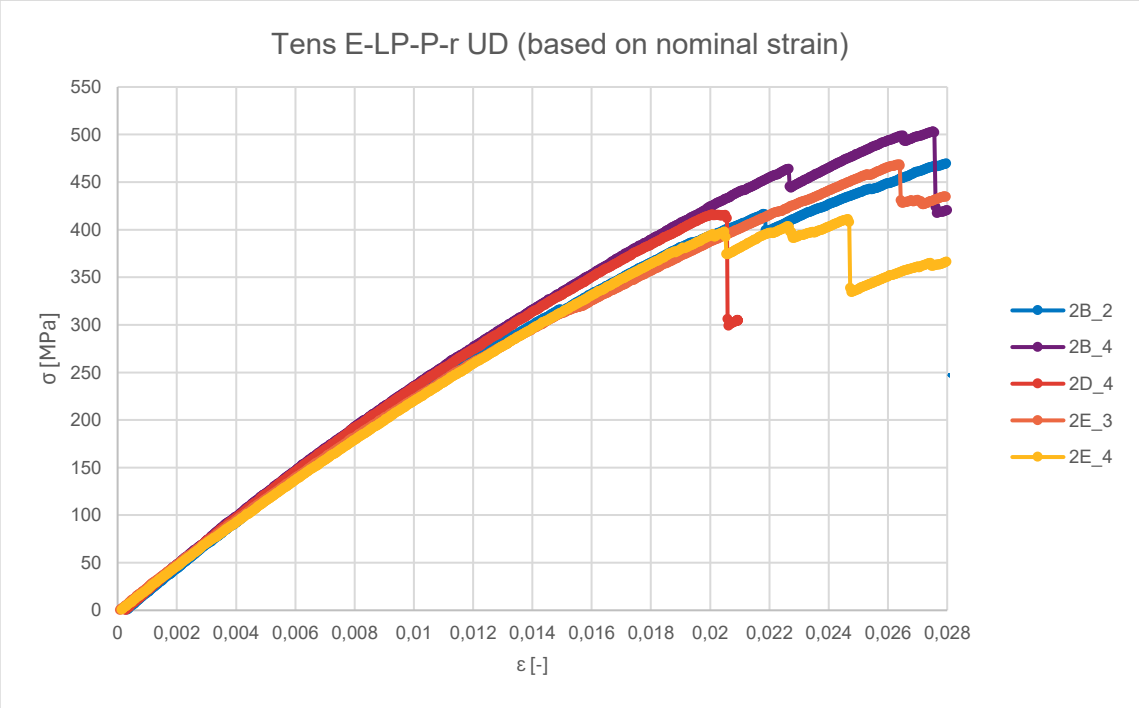
Overall, the test results show that the tested parts of the wind turbine blade still have significant strength and stiffness, enabling further development of the bridge design. In the next design phase, more coupons will be tested, from other parts of the blade, as well as in the perpendicular direction. This should give a more complete understanding of the material properties across the blade.

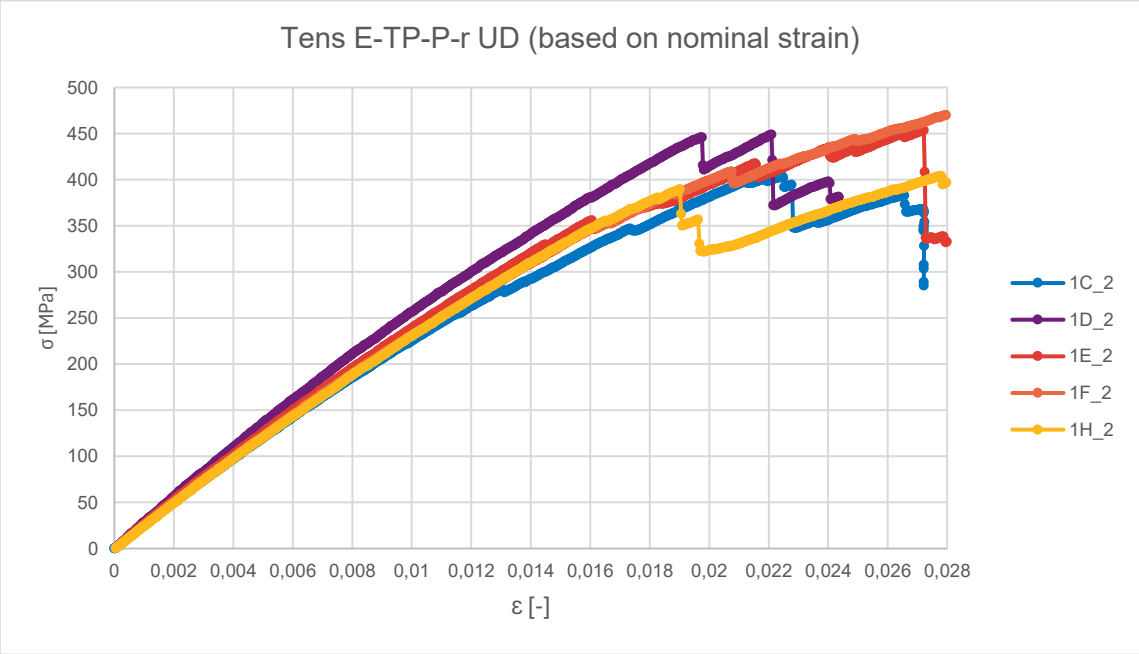
Planned improvements in the test method for the next test phase include implementing an even stricter quality control for the coupon preparation, with special attention to the consistency in fabric layers per coupon and coupon flatness. When testing, the fixation of the extensometer to the specimen shall be improved such that the strain at failure can be measured. Also, for the DIC measurements, photos shall be made at a shorter interval to get more data points, if feasible.

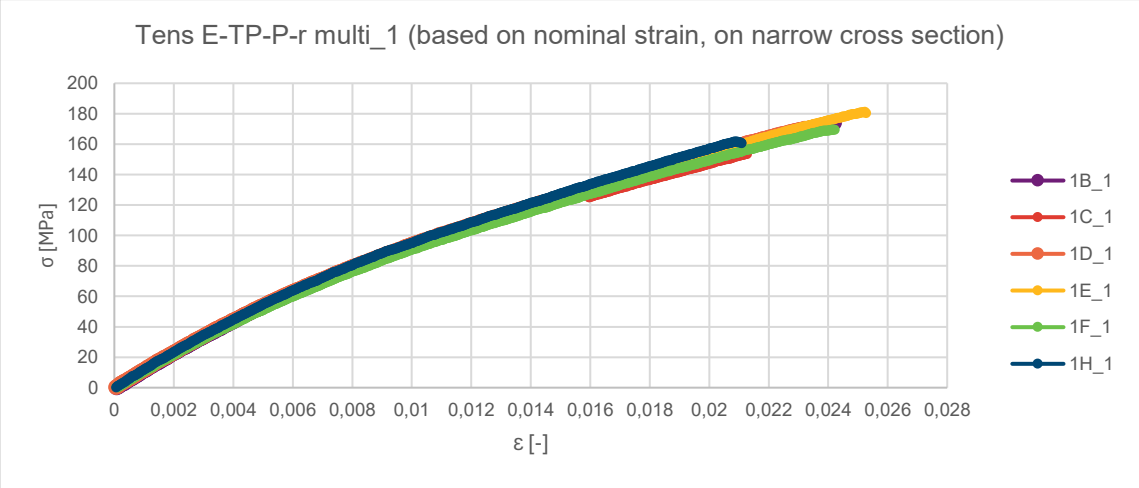
# Appendix A: Test data graphs

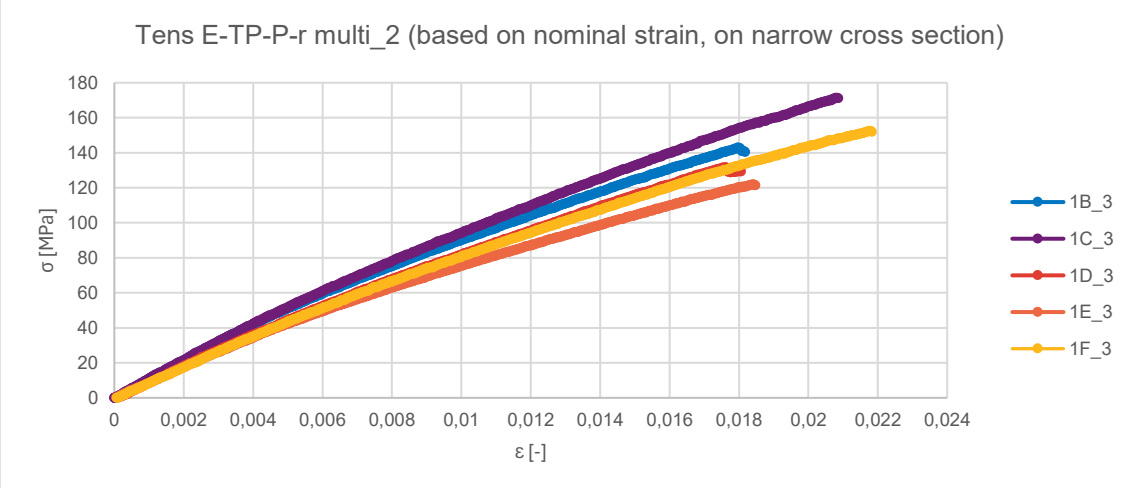
Tension tests – graph data based on the machine's grip displacement

The purpose of these tension graphs is to show the level of consistency in results. As noted in Section 3.2., the reason that these graphs are not used to directly quantify strain at failure, has to do with the slightly tapered shape of the coupon in combination with slight fibre misalignments, which makes the strain distribution of the entire coupon difficult to relate to that of just the gauge length. That is why the Young's modulus is obtained using the extensometer data and not these graphs, and no strain at failure is obtained from these graphs.

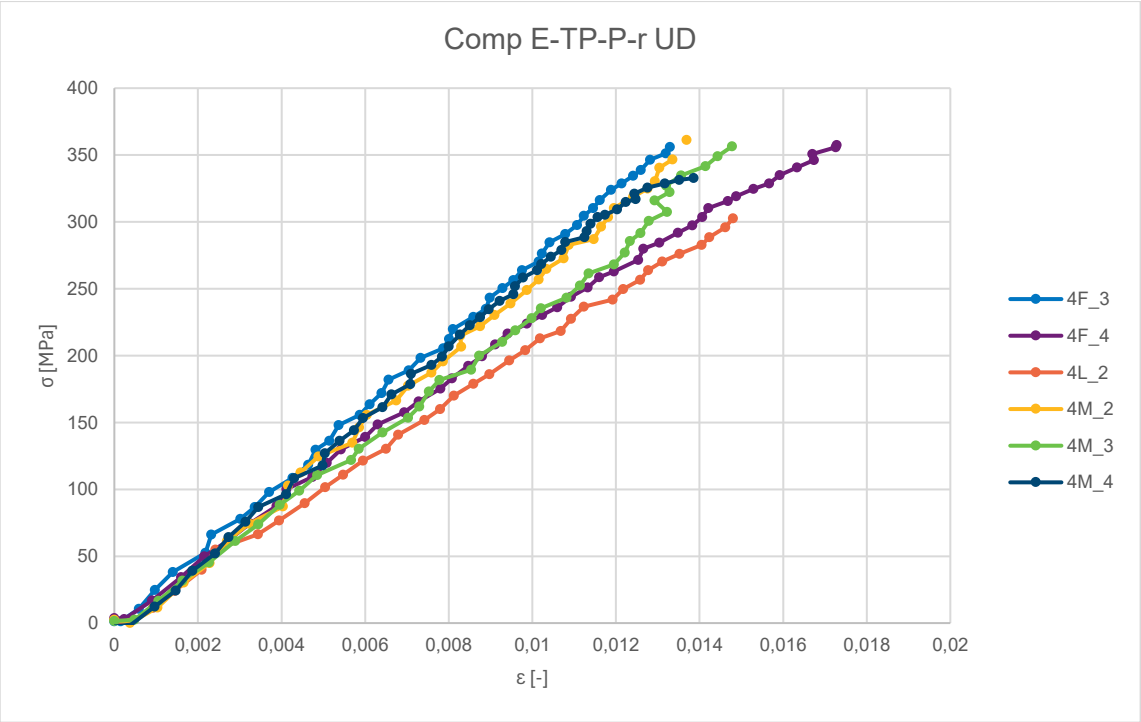


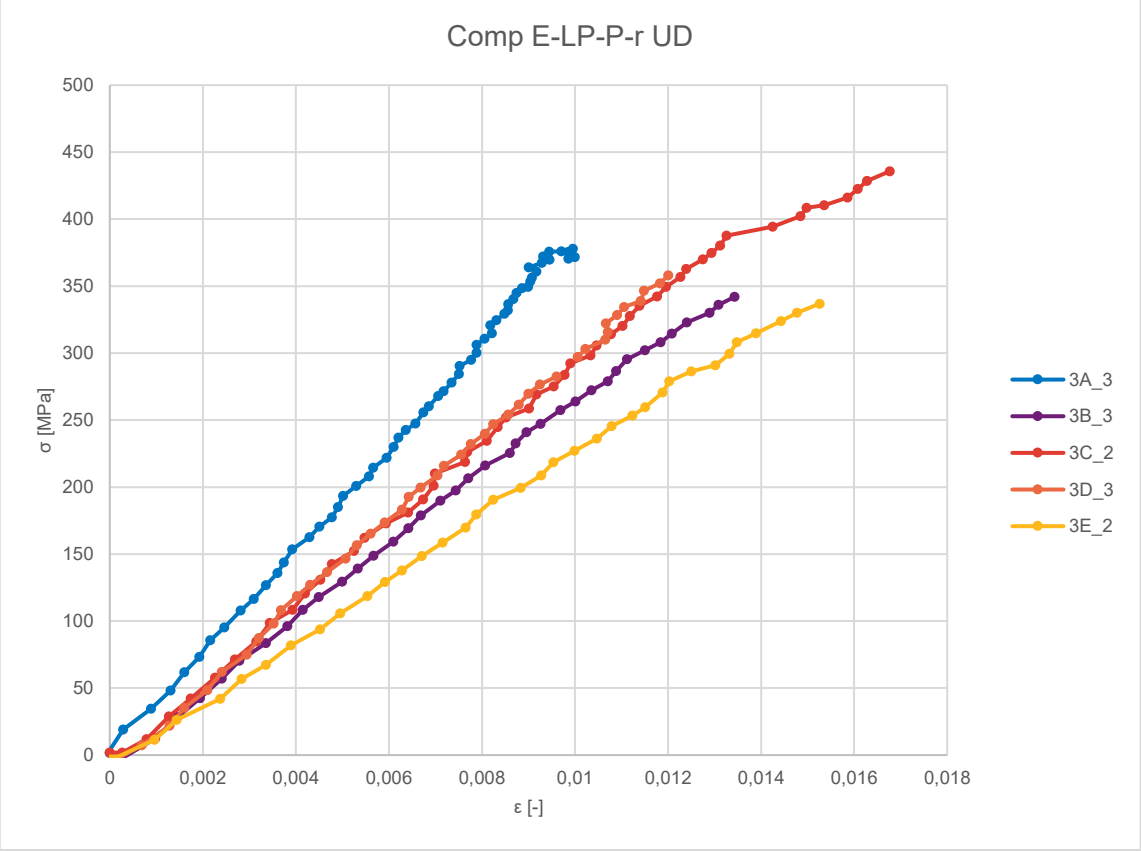

Tens E-TP-P-r UD (based on nominal strain)
σ [MPa]
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0 0,002 0,004 0,006 0,008 0,01 0,012 0,014 0,016 0,018 0,02 0,022 0,024 0,026 0,028
ε [-]
1C_2
1D_2
1E_2
1F_2
1H_2

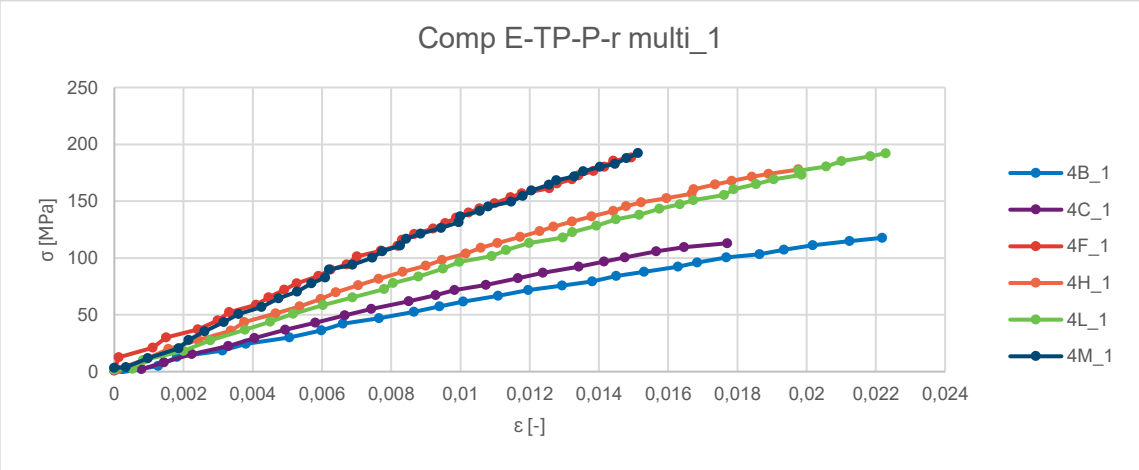

Tens E-TP-P-r multi_1 (based on nominal strain, on narrow cross section)
σ [MPa]
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0 0,002 0,004 0,006 0,008 0,01 0,012 0,014 0,016 0,018 0,02 0,022 0,024 0,026 0,028
ε [-]
1B_1
1C_1
1D_1
1E_1
1F_1
1H_1


Tens E-TP-P-r multi_2 (based on nominal strain, on narrow cross section)
σ [MPa]
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0 0,002 0,004 0,006 0,008 0,01 0,012 0,014 0,016 0,018 0,02 0,022 0,024
ε [-]
1B_3
1C_3
1D_3
1E_3
1F_3

Compression tests – graph data based on DIC measurement




Comp E-TP-P-r multi_1
σ [MPa]
250
200
150
100
50
0
0
0,002
0,004
0,006
0,008
0,01
0,012
0,014
0,016
0,018
0,02
0,022
0,024
ε [-]
4B_1
4C_1
4F_1
4H_1
4L_1
4M_1

# Appendix B: Test data tables

This appendix contains the measurements and test results for the individual coupons.

The width and thickness of each coupon was measured before the test at three positions in the gauged area, of which the average is provided in the table. For the UD specimens, the angle of the fibres was measured after testing, at both the front and the back of the specimen.

Tension tests

*Table B1: Tension test results*

| Panel | Material ID | Coupon name | Width [mm] | Thickness [mm] | Fibre angle front [deg] | Fibre angle back [deg] | Young's Modulus $E_{11}$ [GPa] | Strength $\sigma_{11}$ [MPa] | Linear strain at failure, calculated [-] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 1B_1 | 25.79 | 4.33 | | | 14.3 | 167 | 0.0117 |
| | multi_TP_1 | 1C_1 | 25.78 | 4.31 | | | 14.7 | 153 | 0.0105 |
| | multi_TP_1 | 1D_1 | 25.84 | 4.33 | | | 12.7 | 170 | 0.0134 |
| | multi_TP_1 | 1E_1 | 25.84 | 4.36 | | | 12.3 | 175 | 0.0142 |
| | multi_TP_1 | 1F_1 | 25.83 | 4.41 | | | 13.1 | 160 | 0.0122 |
| | multi_TP_1 | 1H_1 | 25.83 | 4.11 | | | 11.7 | 159 | 0.0135 |
| | multi_TP_2 | 1B_3 | 26.04 | 2.10 | | | 9.1 | 140 | 0.0153 |
| | multi_TP_2 | 1C_3 | 25.98 | 1.68 | | | 10.1 | 168 | 0.0167 |
| | multi_TP_2 | 1D_3 | 26.01 | 1.73 | | | 8.9 | 132 | 0.0148 |
| | multi_TP_2 | 1E_3 | 25.99 | 2.21 | | | 9.0 | 122 | 0.0136 |
| | multi_TP_2 | 1F_3 | 25.98 | 1.75 | | | 9.1 | 143 | 0.0158 |
| | UD | 1C_2 | 25.90 | 4.08 | 2 | 3 | 33.3 | 404 | 0.0121 |
| | UD | 1D_2 | 25.90 | 3.18 | 2 | 3 | 35.7 | 450 | 0.0126 |
| | UD | 1E_2 | 25.93 | 3.44 | 3 | 4 | 31.0 | 453 | 0.0146 |
| | UD | 1F_2 | 25.90 | 3.88 | 2 | 3 | 30.0 | 472 | 0.0157 |
| | UD | 1H_2 | 25.85 | 2.79 | 2 | 3 | 25.7 | 410 | 0.0135 |
| E-LP-P-r | UD | 2B_2 | 25.79 | 3.98 | 4 | 2 | 24.3 | 475 | 0.0196 |
| | UD | 2B_4 | 25.95 | 5.05 | 0 | 1 | 30.1 | 503 | 0.0167 |
| | UD | 2D_4 | 25.96 | 4.74 | 3 | 2 | 27.9 | 416 | 0.0149 |
| | UD | 2E_3 | 26.02 | 3.02 | 3 | 2 | 26.8 | 468 | 0.0175 |
| | UD | 2E_4 | 25.97 | 2.84 | 2 | 2 | 25.2 | 411 | 0.0163 |

Compression tests

*Table B2: Compression test results*

| Panel | Material ID | Coupon name | Width [mm] | Thickness [mm] | Fibre angle front [deg] | Fibre angle back [deg] | Young's Modulus $E_{11}$ [GPa] | Strength $\sigma_{11}$ [MPa] | Strain at failure, recorded [-] | Linear strain at failure, calculated [-] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E-TP-P-r | multi_TP_1 | 4B_1 | 25.87 | 5.36 | | | 7.3 | 124 | 0.0222 | 0.0169 |
| | multi_TP_1 | 4C_1 | 25.79 | 4.71 | | | 8.1 | 124 | 0.0177 | 0.0152 |
| | multi_TP_1 | 4F_1 | 25.68 | 4.41 | | | 11.2 | 195 | 0.0149 | 0.0174 |
| | multi_TP_1 | 4H_1 | 25.77 | 4.06 | | | 11.0 | 185 | 0.0198 | 0.0169 |
| | multi_TP_1 | 4L_1 | 25.84 | 3.51 | | | 11.2 | 204 | 0.0223 | 0.0183 |
| | multi_TP_1 | 4M_1 | 25.70 | 4.39 | | | 13.9 | 201 | 0.0151 | 0.0145 |
| | UD | 4F_3 | 25.83 | 5.82 | 1 | 1 | 27.0 | 373 | 0.0133 | 0.0138 |
| | UD | 4F_4 | 26.06 | 6.31 | 0 | 4 | 23.8 | 372 | 0.0173 | 0.0156 |
| | UD | 4L_2 | 25.77 | 6.48 | 0 | 1 | 26.1 | 333 | 0.0148 | 0.0128 |
| | UD | 4M_2 | 25.74 | 5.05 | 0 | 0 | 26.4 | 395 | 0.0137 | 0.0150 |
| | UD | 4M_3 | 25.82 | 4.42 | 0 | 2 | 23.8 | 375 | 0.0148 | 0.0158 |
| | UD | 4M_4 | 25.90 | 8.08 | 0 | 3 | 26.6 | 338 | 0.0138 | 0.0127 |
| E-LP-P-r | multi_LP_1 | 3A_1 | 25.73 | 2.39 | | | 10.3 | | | |
| | multi_LP_1 | 3B_1 | 25.72 | 3.10 | | | 10.9 | | | |
| | multi_LP_1 | 3D_1 | 25.77 | 3.14 | | | 8.6 | | | |
| | multi_LP_1 | 3E_1 | 25.79 | 3.95 | | | 12.8 | | | |
| | multi_LP_1 | 3F_1 | 25.84 | 3.67 | | | 9.2 | | | |
| | UD | 3A_3 | 25.89 | 7.22 | 3 | 2 | 34.7 | 380 | 0.0099 | 0.0109 |
| | UD | 3B_3 | 25.91 | 6.07 | 1 | 1 | 28.6 | 413 | 0.0134 | 0.0144 |
| | UD | 3C_2 | 25.82 | 5.44 | 1 | 3 | 29.0 | 455 | 0.0168 | 0.0157 |
| | UD | 3D_3 | 25.90 | 5.35 | 2 | 2 | 31.8 | 377 | 0.0120 | 0.0119 |
| | UD | 3E_2 | 25.86 | 5.60 | 2 | 3 | 24.2 | 372 | 0.0152 | 0.0154 |

# Appendix C: Test data “multi_LP_1”

Some coupons of the multidirectional part of the leading edge panel (“E-LP-P-r”) have been tested in tension, but those have been excluded from the report due to issues with coupon preparation that resulted in inconsistent coupon compositions. The results can therefore not be grouped. However, the individual test results could still provide insights and are therefore presented below.

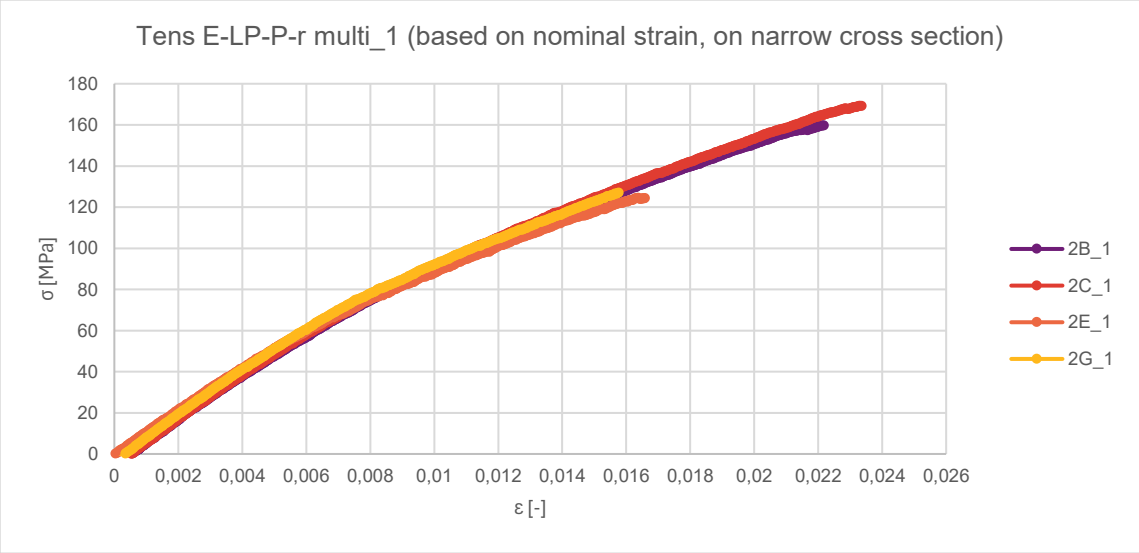



*Table C1: Tension test result of four multi_LP_1 coupons*

| Material ID | Coupon name | Width [mm] | Thickness [mm] | Young’s Modulus $E_{11}$ [GPa] | Strength $\sigma_{11}$ [MPa] | Linear strain at failure, calculated [-] | Differences relative to coupon “multi-LP_1-1” |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| multi-LP_1-1 | 2B_1 | 25.72 | 2.20 | 10.6 | 160 | 0.0151 | - |
| multi-LP_1-2 | 2C_1 | 25.72 | 2.86 | 12.2 | 153 | 0.0125 | Slight amount of UD |
| multi-LP_1-3 | 2E_1 | 25.73 | 1.29 | 8.8 | 114 | 0.0129 | Misses 0/90 layer |
| multi-LP_1-4 | 2G_1 | 26.43 | 2.42 | 7.9 | 127 | 0.0161 | Misses 0/90 and 45 layer |

# Bijlage E – Checklist

**Voorontwerp P085 Checklist**



**Brug Geelkruid**

| | |
|---|---|
| Locatie: | : Rotterdam, wijk Zuidwijk, Rotterdam Zuid |
| Objectcode oud: | : P085 |
| Objectcode nieuw: | : n.t.b. |
| W.B.S.nr: | : - |
| Waterschap: | : Waterschap Hollandse Delta |
| Watergang: | : Primair |
| | |
| **Type:** | **: Unica** |
| Locatie ingemeten | : ja |
| Huidige lengte: | : 18 m |
| Nieuwe lengte: | : 21,9 m |
| Huidige breedte: | : 2,5m |
| Nieuwe breedte: | : 2,5 m (nuttige breedte) |
| Huidige doorvaarthoogte: | : ca 1 m |
| Benodigde doorvaarthoogte: | : 1,10 m |
| Oever: | : talud |
| Middensteunpunt: | : ja |
| Materiaal dek: | : composiet |
| Materiaal leuning: | : staal |
| Aanlanding leuning | : staal |
| Kleuroptie: | : n.t.b. |
| Materiaal aanlandende paden: | : betontegels |
| Afwerking taluds: | : Open grasbetontegels |
| Aanpassing talud nodig: | : ja |
| Aanpassing aanlanding nodig: | : ja |
| Taludbeschoeiing vernieuwen: | : ja, hout |
| K&L aanwezig: | : ja, gas en elektra |
| Bereikbaarheid: | : Zuidzijde = goed, noordzijde = alleen klein materieel |
| Risico's: | : Innovatief ontwerp, eerste pilot. |
| Afstemming wijkregisseur : | : http://www.rotterdam.nl/wijkregisseurs |
| Afstemming waterschap | : ja |
| Objecten in omgeving: | : boom, doorrijdbeveiliging |
| Voorontwerp raming | : Zie raming |
| Decompositie | : bij oplevering |

Meubilering:

| | | |
|---|---|---|
| - Doorrijdbeveiliging | NEE | Locatie: n.v.t. |
| - Verlichting | NEE | Locatie: n.v.t. |
| - Fietssluis | NEE | Locatie: n.v.t. |
| - Afsluitbaar hek | NEE | Locatie: n.v.t. |
| - Leuning / zitting | JA | Locatie: 2-zijdig |
| - Paaltje | JA | Locatie: voor en achter brug |

| Akkoord stedelijk beheer | Akkoord StadsOntwikkeling |
|---|---|
| | |
| Naam: RR. Aartsen | Naam: |
| Functie: Beheerder | Functie: |
| Datum | Datum: |
| Handtekening: | Handtekening: |