

Hogeschool Rotterdam / Gemeente Rotterdam

VVK in tuibruggen

Eindrapport

Naam:	Lennart Kraaijenbrink
Studentnummer:	0884858
Versie:	1.0 (definitief)
Datum:	dinsdag 13 juni 2017

Samenvatting

Vezelversterkt kunststof (VVK) is een opkomend materiaal in de bouwwereld, wat zich op relatief kleine parkbruggen al bewezen heeft. Om het tot een echt concurrentiemateriaal te maken voor conventionele materialen zal het zich ook moeten bewijzen in grote bruggen. Tuibruggen kunnen grote overspanningen halen en het constructief toepassen van VVK is haalbaar. Het belangrijkste aandachtspunt van VVK waar rekening mee gehouden moet worden tijdens het ontwerp is de stijfheid. VVK heeft een relatief lage E-modulus in vergelijking met staal, maar is wel veel lichter. De sterkte van VVK geeft geen uitdagingen. Door slim te ontwerpen kan er goed met de nadelen van VVK om worden gegaan.

Een VVK leuning integreren met een VVK dek geeft een hoog traagheidsmoment, wat de E-modulus compenseert. Daarnaast heeft weinig onderhoud nodig. Het grote nadeel is dat de productiekosten en mogelijkheid tot productie het tegenhoudt. Een VVK leuning achteraf op het brugdek monteren is momenteel de meest haalbare optie. Er kan dan gekozen worden voor twee mogelijkheden: de leuning wel of niet constructief laten meewerken. Er is gebleken dat wanneer de leuning niet constructief meewerkt en de stijfheid uit het dek moet komen, dat de benodigde stijfheid moeilijk gehaald kan worden. Hierdoor moeten er extra maatregelen worden getroffen om de gevolgen op te vangen. Onwenselijke trillingen in het brugdek kunnen worden opgevangen door 'Tuned Mass Dampers' (TMD's). TMD's zorgen ervoor dat trillingen verminderd worden. De trillingen in het brugdek worden getoetst aan het comfort van de gebruiker van de brug. In VVK is dit vaak maatgevend voor de dikte van het brugdek. Een ander belangrijk aandachtspunt in het ontwerp van een VVK dek is de dwarskracht. De dwarskracht wordt opgevangen door de lijfplaten in de sandwichconstructie. De dwarskracht kan 'delaminatie' veroorzaken tussen de huiden en de kern van het sandwichdek. Door z-lagen in het dek te verwerken, kan delaminatie worden voorkomen. Z-lagen zijn lamellen die in een z-vorm van de bovenhuid, door de lijfplaten, naar de onderhuid gaan. De beste optie is om een VVK dek toe te passen met een constructief meewerkende leuning er op gemonteerd. Dit dek wordt ontworpen op trillingen en dwarskracht. Wanneer de leuning meewerkt aan de stijfheid van het brugdek kan er slanker geconstrueerd worden dan wanneer de leuning niet meewerkt aan de stijfheid.

Voor de pyloon van de brug is knik het maatgevende bezwijkmechanisme. Wanneer er VVK in de pyloon wordt toegepast zal de top van de pyloon meer doorbuigen in vergelijking met staal. Dit brengt bepaalde risico's met zich mee waar nog nader onderzoek naar gedaan moet worden. Eén van die risico's is dat de tuien ontlast kunnen worden. De tuien hebben namelijk een minimale spanning nodig, anders gaan ze doorhangen. Wanneer de tuien gaan doorhangen zijn ze zeer gevoelig voor resonantie, wat tot bezwijken kan leiden. Er wordt om die reden ook niet gerekend aan de tuien met de E-modulus van staal, maar een fictieve E-modulus. De fictieve E-modulus neemt af wanneer de spanning ook afneemt. Naast het doorhangen van de tuien, wordt de uitrekking van de tuien ook groter. Dit heeft tot gevolg dat het brugdek ook gevoeliger wordt voor resonantie.

Voorwoord

Voor u ligt het onderzoeksrapport 'VVK in tuibruggen'. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Gemeente Rotterdam en in het kader van mijn afstuderen. In het vierde jaar van de studie Civiele Techniek heb ik gekozen voor de minor 'constructief ontwerpen'. Het onderwerp van dit onderzoek sluit goed hierop aan en bovendien ook op mijn interesses. Het is daarom een mooie afsluiting van de opleiding.

Het onderzoek is voortgekomen uit het idee om voor een eventuele derde stadsbrug in Rotterdam VVK toe te passen. Tot op heden worden er voornamelijk parkbruggen van VVK gemaakt. De stap van relatief kleine parkbruggen tot een gelijkwaardige aan de Erasmusbrug is erg groot. Daarom wordt er een tussenstap gemaakt, namelijk een brug met een overspanning van 100 meter. Uiteindelijk is ervoor gekozen om een tuibrug te behandelen en deze zo goed mogelijk uit te werken in VVK.

Hoewel er nog wel vervolgonderzoek nodig is wil ik met dit onderzoek laten zien in hoeverre VVK kan concurreren met staal in een tuibrug. Ik hoop hiermee een stap te zetten naar de verdere ontwikkeling van VVK in bruggen met grotere overspanningen.

Het onderzoek is uitgevoerd onder begeleiding van ing. W. Schutte van de Gemeente Rotterdam en ir. M. Kamps van de Hogeschool Rotterdam. Ik wil beiden bedanken voor het richting geven in het onderzoek en het geven van opbouwende kritiek.

Rotterdam, juni 2017

Lennart Kraaijenbrink

Inhoud

Samenvatting	1
Voorwoord	2
Symbolenlijst	5
Inleiding	7
Leeswijzer	7
1. Doel- en vraagstelling	8
Doel- en vraagstelling	8
Opzet onderzoek	9
Scope	9
2. Productie van VVK	10
Handlamineren	10
Vacuümtechnieken	11
Wikkelen	11
Pultrusie	11
Verbindingstechnieken	12
Antwoord op deelvraag 1	12
3. Eigenschappen van VVK	13
Stijfheid	13
Sterkte	15
Reële waarden voor de eigenschappen	16
4. Bezwijkmechanismen	17
Delaminatie	17
Resonantie (comfort)	17
Knik	18
Kruip	19
Vermoeiing	19
Schade door vocht	19
Schade door temperatuur en brand	20
Impactschade en vandalisme	20
5. Verschil met andere materialen	21
Materiaaleigenschappen	22
Verschillen van VVK met andere materialen	23
Antwoord op deelvraag 2	25
6. VVK in een tuibrug	26
De tuien	26

Modelering van de tuien	26
Eigenfrequentie van de tuidraden	27
De pyloon	28
De pyloon van de ringvaartplasbrug	29
De kosten	30
Het brugdek	31
Sandwichconstructie	31
Trogconstructie	34
Vergelijk	35
7. Conclusies en aanbevelingen	36
Vervolgonderzoek	36
Ringvaartplasbrug in VVK	37
Bibliografie	38
Bijlagen	40

Symbolenlijst

Deze lijst is niet compleet, er zijn meer symbolen gebruikt voor minder specifieke dingen.

Symbolen Latijn

A	Oppervlakte in [mm ²]
$a_{\max}$	Optredende versnelling [m/s ²]
a_{limit}	Maximale versnelling [m/s ²]
C_c	Filament contiguity factor
C	Stijfheid [MPa]
E	Elasticiteitsmodulus [MPa]
E_f	Fictieve elasticiteitsmodulus [MPa]
E_0	Startwaarde elasticiteitsmodulus [MPa]
f	Frequentie [Hz]
$f_{y;d}$	vloeigrens van staal [MPa]
$f_{c,k}$	Karakteristieke druksterkte van de staaf in de richting van de staaf-as [MPa]
$f_{c,stab,k}$	Karakteristieke druksterkte rekening houdend met plooien en plaatimperfecties [MPa]
G	Afschuivingsmodulus [MPa]
I	Traagheidsmoment [mm ⁴]
K	Stijfheid [MPa]
L	Lengte [mm]
L_{hor}	Horizontale projectie van de tui [mm]
M	Massa [kg]
m^*	Modale massa [kg]
N_{cr}	Eulerse knikkracht [kN]
Q	Stijfheid [MPa]
S	compliantie [MPa]
T	Temperatuur [K]
v	Vezelvolumegehalte [%]
$V_{\max}$	maximale dwarskracht [kN]
x	Plaatsafhankelijke coördinaat [m]

Symbolen Grieks

ν	Poissonverhouding [%]
τ	Schuifspanning [MPa]
γ	Materiaalfactor [-]
ϵ	rek [%]
σ_a	Variantie van de versnelling van het brugdek [...]
σ	Spanning in de tui [MPa]
ρ	Reductiefactor voor het lokaal plooien en lokale imperfecties van op druk belaste staven
ρ	Soortelijk gewicht [kg/m ³]
α	Lineaire uitzettingscoëfficiënt [10 ⁻⁶ /K]
ψ	Reductiecoëfficiënt [-]
μ	Permanente massa per strekkende meter [kg/m]
$\phi(x)$	Eigentrilvorm als functie van de lengte van het bruikdek
η_{ck}	Conversiefactor voor kruip effecten [-]
η_{cf}	Conversiefactor voor vermoeiingseffecten [-]
η_{cv}	Conversiefactor voor vocht effecten [-]
η_{ct}	Conversiefactor voor temperatuur effecten [-]

$\bar{\lambda}_T$	Relatieve slankheid [-]
X	reductiefactor voor knik [-]

Veelgebruikte subscripten

1, 2 en 3	Richtingen, respectievelijk x-, y- en z-richting
4, 5 en 6	Vlakken
c	Composite
m	Matrix
f	Fibre
i	Richtingen en vlakken (1 t/m 6)
j	Trek-, druk-, of afschuif-richting
Ed	Rekenwaarde van de optredende belasting
Rd	Rekenwaarde van de opneembare belasting

Inleiding

Er bestaan al talloze bruggen in hout, beton en staal. Tegenwoordig hebben bruggen van vezelversterkt kunststof (VVK) bewezen dat ze goed toe te passen zijn op korte overspanningen. Deze overspanningen gaan tot ongeveer 30 meter. Om het als serieuze concurrentie te zien van de conventionele materialen zal VVK zich ook moeten bewijzen op grotere overspanningen.

In dit onderzoek wordt er een VVK brug met een overspanning van 100 meter beschouwd. Wanneer er glasvezels worden toegepast in het composiet is een vrije overspanning van 30 meter al moeilijk te halen met een VVK brug, laat staan 100 meter. Er wordt daarom onderzocht hoe een VVK brug eruit moet komen te zien in de vorm van een tuibrug.

Als referentiebrug wordt de ringvaartplasbrug gebruikt. Deze tuibrug heeft een overspanning van 107 meter met 20 meter tussen de tuien in. Het brugdek haalt zijn stijfheid uit de constructief meewerkende vakwerkleuning. Hierdoor kan het brugdek zeer slank worden ontworpen.



Figuur 1: Ringvaartplasbrug

Leeswijzer

In *hoofdstuk 1* wordt er uitgelegd hoe het onderzoek wordt opgezet. Door een doel- en vraagstelling te formuleren wordt er een richting gegeven aan het onderzoek. Het onderzoek wordt nog verder afgebakend, zoals staat geformuleerd onder het kopje *scope*.

In *hoofdstuk 2* wordt er ingegaan op de productie van VVK en verbindingstechnieken. Het nut van dit hoofdstuk is om inzicht te krijgen waar de verschillende productiemethodes voor gebruikt kunnen worden. Met dit hoofdstuk wordt er een antwoord gegeven op *deelvraag 1*.

Deelvraag 2 wordt beantwoord in de *hoofdstukken 3, 4, 5 en 6*. Het geeft uitleg over de achtergrond van de eigenschappen van VVK. Deze worden vergeleken met eigenschappen van andere materialen. Daarnaast worden er bezwijkmechanismen genoemd die op kunnen treden met VVK. Voor elk bezwijkmechanisme wordt er een mogelijke ontwerp oplossing gegeven. Bij deze hoofdstukken hoort *bijlage I*.

Het vergelijk van de bestaande ringvaartplasbrug met de ringvaartplasbrug met VVK elementen wordt beschreven in *hoofdstuk 6*. Hierin worden de 3 hoofdonderdelen van de bovenbouwconstructie van een tuibrug behandeld: de tuien, het brugdek en de pyloon. Bij dit hoofdstuk horen *bijlage II, bijlage III, bijlage IV*.

In *hoofdstuk 7* worden de conclusies en aanbeveling gegeven waaruit vervolgens een ontwerp gemaakt kan worden waar VVK zo optimaal mogelijk gebruikt wordt. Bij dit hoofdstuk hoort *bijlage V en bijlage VI*.

1. Doel- en vraagstelling

Doel- en vraagstelling

De gemeente Rotterdam heeft inmiddels circa 100 bruggen vervangen met VVK bruggen. Dit zijn relatief kleine bruggen met een overspanningen tot 30 meter. De vraag hoe vezelversterkt kunststof in grotere bruggen kan worden toegepast ligt er nog.

In dit afstudeeronderzoek wordt er onderzocht hoe VVK kan worden toegepast in een tuibrug voor voetgangers en fietsers met een overspanning van 100 meter. Door het ontwerpen van een nieuwe variant van een bestaande fietsbrug, wordt er geconcludeerd hoe een brug van zo'n overspanning eruit komt te zien om het materiaal zo efficiënt mogelijk te gebruiken. Daar zitten twee sporen in: een fietsbrug bestaande uit alleen VVK of een hybride constructie.

Om aan te tonen hoe een brug met een dergelijke overspanning eruit komt te zien, wordt er een ontwerp gemaakt voor de ringvaartplas brug in VVK. De vormgeving van dit ontwerp wordt bepaald aan de hand van sterkte- en dynamicaberekeningen (comfort). Dit geeft de volgende doelstelling: *'Ontwerp een tuibrug voor langzaam verkeer die voldoet aan de sterkte- en comforteisen waarin VVK zo efficiënt mogelijk kan worden toegepast en een voordeel heeft ten opzichte van conventionele materialen.'*

Uit deze doelstelling is de volgende vraagstelling geformuleerd:

'Op welke manier kan VVK constructief worden toegepast in een tuibrug voor fietsers en voetgangers met een overspanning van 100 meter?'

Om een antwoord op de vraagstelling te vinden wordt de vraag in 3 deelvragen verdeeld, welke onderverdeeld worden in subdeelvragen:

1. *Hoe wordt VVK geproduceerd en waar haalt VVK constructieve voordelen uit met betrekking op een tuibrug voor langzaam verkeer?*
 - a. *Hoe worden de soorten VVK geproduceerd?*
 - b. *Wanneer wordt er voor een bepaalde productiemethode gekozen?*
2. *Wat zijn de mechanische eigenschappen van VVK en waarin verschilt dit met andere constructiematerialen?*
 - a. *Wat zijn de mechanische eigenschappen van VVK?*
 - b. *Voor welke bezwijkmechanismen is VVK gevoelig?*
 - c. *Hoe verschilt VVK met andere materialen en wat zijn daar de voordelen van bij het ontwerp van een VVK fietsbrug?*
3. *Hoe kan een VVK tuibrug voor langzaam verkeer met een overspanning van 100 meter worden vormgegeven, wil het voldoen op sterkte en comfort?*
 - a. *Hoe werk een tuibrug?*
 - b. *Is het constructief toepassen van VVK in de tuien efficiënt ten opzichte van staal?*
 - c. *Is het constructief toepassen van VVK in de pyloon efficiënt ten opzichte van staal?*
 - d. *Is het constructief toepassen van VVK in het brugdek efficiënt ten opzichte van staal?*
 - e. *Is het de moeite waard om de leuning mee te laten werken in de stijfheid van het brugdek?*

Opzet onderzoek

In dit onderzoek wordt er een vergelijking gemaakt tussen de bestaande ringvaartplasbrug en dezelfde brug gebouwd in VVK. Het vergelijking wordt als volgt gedaan:

- Er worden verschillende varianten brugdekken, met VVK elementen of compleet van VVK, beschouwd. Hieruit volgt de beste variant welke vervolgens wordt vergeleken met het bestaande brugdek. In het vergelijking van de brugdekken wordt de pyloon van staal gelaten en wordt het brugdek conform dezelfde normen en belastingen getoetst als de bestaande brug.
- Wanneer de VVK pyloon wordt vergeleken met de bestaande stalen pyloon, wordt het brugdek van staal gelaten. Ook hier geldt dat de VVK pyloon wordt getoetst conform dezelfde normen en belastingen getoetst als de bestaande brug.

Uit de voorgaande twee punten kan worden geconcludeerd of het de moeite waard is om VVK toe te passen in plaats van staal op bepaalde onderdelen in de brug. Hieruit wordt een nieuw ontwerp gemaakt van de ringvaartplasbrug met VVK erin verwerkt. Het nieuwe ontwerp wordt getoetst conform de eurocode samen met de 1^e herziende versie van de CUR 96.

Scope

De volgende punten geven de scope van het onderzoek weer:

- De ringvaartplasbrug wordt als referentiebrug gebruikt en zal in dimensionering niks veranderen. Het is mogelijk dat een andere vorm van de pyloon of meer/minder tuien beter zijn in VVK. Als dit het geval is zal dit benoemd worden en worden aanbevolen. Vanwege de beschikbare tijd zal het niet helemaal uitgewerkt worden tot een tweede ontwerp van de ringvaartplasbrug.
- In dit onderzoek zal er een kostenvergelijking worden gemaakt tussen staal en VVK. Hierbij zal alleen worden gekeken naar de materiaal- en productiekosten. De onderhoudskosten worden buiten beschouwing gelaten.
- De berekening van de fundering wordt buiten beschouwing gelaten.
- Een belangrijk aspect van een tuibrug is dat er één van de tuien uit gehaald moet kunnen worden, zonder dat de brug bezwijkt. In het ontwerp van de ringvaartplasbrug is hierop gerekend. In dit onderzoek wordt er aangenomen dat het ontwerp in VVK hier ook op zal voldoen. Er zullen hier geen berekeningen over uitgevoerd worden.

2. Productie van VVK

Een composiet is opgebouwd uit vezels en harsen. In bruggen worden glasvezels gebruikt, omdat koolstofvezels simpelweg te duur zijn. De hars kan bestaan uit polyester, vinylester, epoxy of fenol.

Een composiet is opgebouwd uit lamellen, welke verder onderscheiden kunnen worden in:

- UD-lamellen
- Weefsel-lamellen
- Mat-lamellen

Bij UD-lamellen zijn de vezels slechts in één richting georiënteerd (uni-directioneel). De materiaaleigenschappen in de vezelrichting verschillen daardoor sterk van de eigenschappen loodrecht op deze vezelrichting. Het vezelvolumepercentage van UD-lamellen kan, afhankelijk van het type vezelversterking en het productieproces, variëren tussen 40 en 70%.

Bij weefsellamellen zijn de vezels in twee onderling loodrechte richtingen georiënteerd. De materiaaleigenschappen in de andere vezelrichtingen verschillen met deze twee onderling loodrechte richtingen. Het vezelvolumepercentage van weefsellamellen kan, afhankelijk van het type weefsel en het productieproces, variëren van 25 tot 55%.

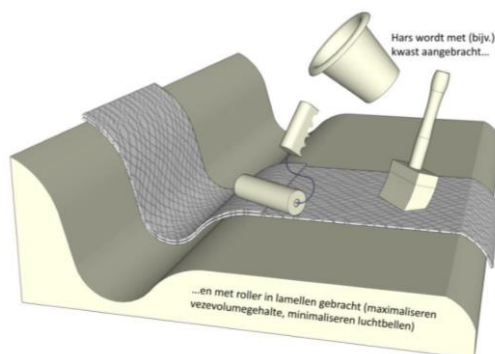
Bij mat-lamellen zijn de vezels kriskras in alle richtingen georiënteerd. De materiaaleigenschappen zijn in alle richtingen nagenoeg gelijk. Het vezelvolumepercentage van mat-lamellen kan, afhankelijk van het type mat en het productieproces, variëren tussen 10 en 30%. (CUR commissie C 124, 2003)

De kwaliteit van het composiet hangt niet alleen af van de materialen die er gebruikt worden, maar ook de manier waarop het eindproduct wordt gemaakt. Als er in het ontwerp rekening is gehouden met bijvoorbeeld UD-lamellen met een vezelvolumepercentage van 60% (hoog percentage), is dat niet met elke vervaardigingsmethode te bereiken.

Er zijn een heleboel verschillende vervaardigingsmethoden voor VVK. Bij de productie van bruggen wordt er gebruikt gemaakt van 4 methodes: handlamineren, vacuümtechnieken, wikkelen en pultrusie.

Handlamineren

De naam van de methode zegt het al, er wordt met de hand gelamineerd. Dit betekent ook dat het een arbeidsintensieve methode is. Het is daarom minder geschikt om het in massaproductie toe te passen. VVK fietsbruggen van 100 meter zullen voor alsnog niet vaak gebouwd worden, wat het geschikter maakt voor dit soort bruggen. Een groot voordeel van deze methode is de ontwerpvrijheid. Het grootste constructieve nadeel van deze methode is dat er geen hoge vezelpercentages bereikt kunnen worden.

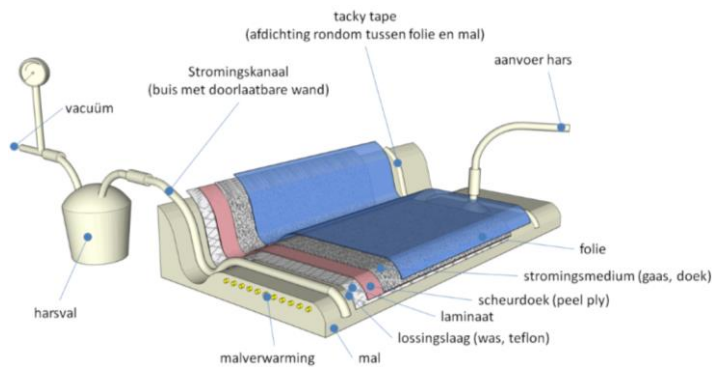


Figuur 2: Handlamineren (Nijssen, 2015)

Vacuümtechnieken

Waar voor de methode van handlamineren een open mal nodig is, is bij vacuümtechnieken een gesloten mal nodig. Dit houdt in dat na het plaatsen van de vezels in de mal, er een 'deksel' of vacuümfolie op wordt geplaatst. Door middel van vacuümzuigen wordt de hars tussen de mallen geïnjecteerd.

Vacuümtechnieken zijn iets preciezer in het maken van het composiet ten opzichte van handlamineren. Hierdoor zijn er vezelpercentages mogelijk tot 50%.



Figuur 3: Vacuümtechniek (Nijssen, 2015)

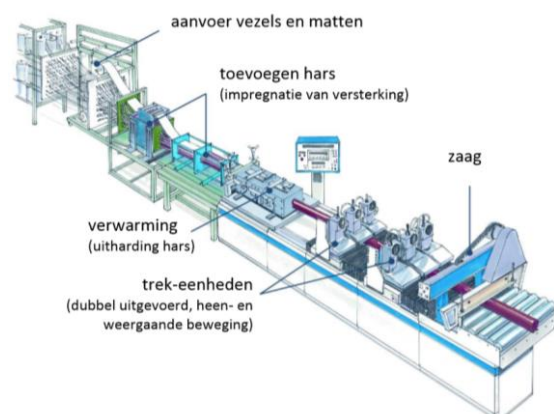
Wikkelen

Met deze productiemethode worden vaak grotere (bij voorkeur ronde) profielen gemaakt. De vezels worden in hars geïmpregneerd en vervolgens om een mal heen gewikkeld. Een nadeel van deze methode is dat niet elk bedrijf de vezels in 2 richtingen kan leggen, laat staan nog meer richtingen. Het is ook gebruikelijk dat met deze methode UD-lamellen gemaakt worden, maar hier kan natuurlijk van afgeweken worden.

In de hoofdrichting kunnen hoge vezelvolumepercentages worden gehaald, tot wel 70%.

Pultrusie

Pultrusie is een heel mechanisch proces. Bij dit proces worden de vezels gepositioneerd, waar vervolgens de hars omheen geplaatst wordt. Deze methode is zeer geschikt voor de massaproductie van profielen en brugdekken. Sterker nog, het is niet efficiënt om 1 profiel of 1 brugdekplank te maken, omdat de productiekosten hier te hoog voor zijn. Met deze methode kan een zeer hoog vezelpercentage bereikt worden (tot 70%).

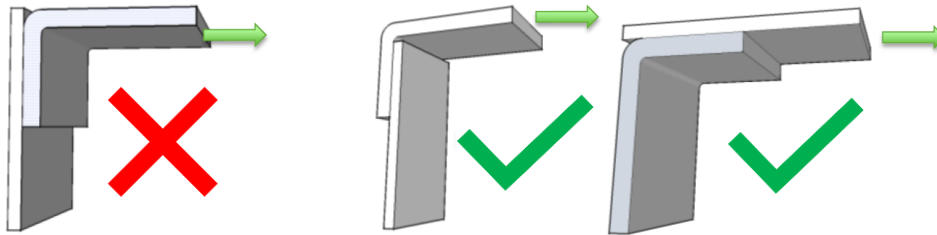


Figuur 4: Pultrusie techniek (Nijssen, 2015)

Verbindingstechnieken

Boutverbindingen kennen in VVK dezelfde faalmechanismen als in staal. Daarnaast kunnen er ook binnenin het VVK laminaat spanningen ontstaan die leiden tot bezwijken.

Een andere vorm van verbinden zijn lijmverbindingen. Deze zijn erg gebruikelijk met VVK omdat deze verbindingen erg sterk zijn zolang ze alleen op afschuiving worden belast. Lijmverbindingen kunnen pelspanningen (trekspanning loodrecht op het lijmvlak) niet goed opnemen. Wanneer pelspanningen gaan optreden en de kracht centreert zich op 1 punt, dan laat de lijm los op dat punt. Hierdoor wordt het lijmoppervlak kleiner met de gevolgen van dien. Pelspanningen moeten dus zoveel mogelijk voorkomen worden (figuur 5).



Figuur 5: Lijmverbindingen (Nijssen, 2015)

Antwoord op deelvraag 1

Bij een fietsbrug met een overspanning van 100 meter zal de doorbuiging maatgevend worden. Voor doorbuigingen zijn de vier belangrijkste invloedsfactoren: de overspanning van de brug, de opgelegde belasting, de E-modulus van het composiet en het kwadratisch oppervlaktemoment van de constructie. De afmetingen van de brug en de verticale belasting op de brug zijn niet te veranderen, wat de E-modulus en het kwadratisch oppervlaktemoment overlaat als beïnvloedbare factoren op de doorbuiging.

Tabel 1: Haalbare vezelvolumepercentages

	Ontwerp	Kosten	Haalbare vezelvolumepercentages		
			Mat	Weefsel	UD
Handlamineren	Vrij	Goedkoop	10% - 20%	25% - 40%	40%-50%
Vacuümtechnieken	Vrij	Goedkoop	10% - 20%	40% - 50%	50% - 60%
Wikkelen	Beperkt tot maximaal 2 richtingen	Afhankelijk van het profiel	n.v.t	n.v.t	50% - 70%
Pultrusie	Enkel profielen	Afhankelijk van het profiel	20% - 30%	40% - 55%	50% - 70%

Om een hoge E-modulus te verkrijgen, moet het vezelpercentage ook hoog zijn. Voor een hoog vezelpercentage kan er worden gekeken naar de pultrusie vervaardigingsmethode. Dit betekent dat de constructie opgebouwd zal worden uit profielen.

Een hoog kwadratisch oppervlaktemoment is het beste te bereiken door een hoge constructie toe te passen. Hiervoor is veel ontwerpvrijheid nodig en daarom zijn de vervaardigingsmethoden handlamineren en vacuümtechniek goed te toepassen.

Een goede manier om VVK te verbinden is met lijm. Dit is een zeer betrouwbare verbinding als het alleen op dwarskracht wordt belast. Pelspanning in de lijmverbinding moet zoveel mogelijk worden voorkomen.

3. Eigenschappen van VVK

Doordat VVK een anisotroop materiaal is, maakt het de eigenschappen van het materiaal ten opzichte van materialen als staal en beton complexer. De eigenschappen van VVK hangen van een aantal factoren af:

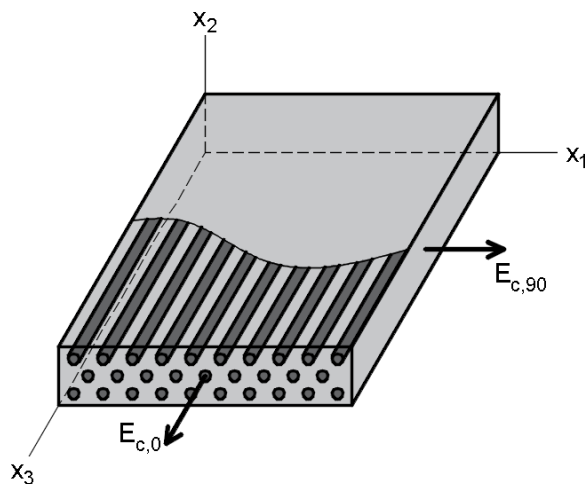
- De soort vezel;
- De soort hars;
- Opbouw van VVK / vezelpercentage;
- De productie.

Stijfheid

Karakteristiek voor VVK is dat het een lage stijfheid heeft ten opzichte van staal. Dit maakt dat, in tegenstelling tot staal, doorbuigingen vaker maatgevend zijn voor de vormgeving van een fietsbrug. De stijfheid van een materiaal wordt uitgedrukt in een elasticiteitsmodulus [MPa]. Met de mengselregel is in theorie te bepalen wat de E-modulus is van het composiet. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt in de E-modulus in de vezelrichting (parallelmodel) en haaks op de vezelrichting (seriemodel). Volgens de mengselregel zijn de formules voor de E-modulussen als volgt:

$$E_{c,0} = v_f E_f + v_m E_m \quad [1]$$

$$\frac{1}{E_{c,90}} = \frac{1}{v_f E_f} + \frac{1}{v_m E_m} \quad [2]$$



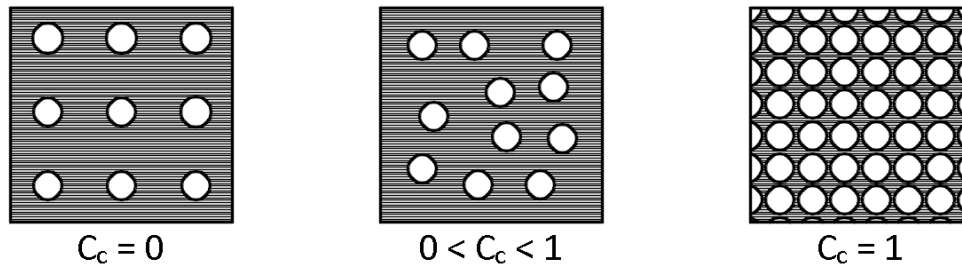
Figuur 6

In de praktijk komt de E-modulus in de vezelrichting goed overeen met de theorie van de mengselregel. Dit kan niet worden gezegd over de E-modulus loodrecht op de vezelrichting. Deze blijkt in de praktijk veel hoger uit te vallen dan de theorie van de mengselregel aangeeft. Er zijn verschillende methodes ontwikkeld om de E-modulus loodrecht op de vezelrichting te bepalen die de realiteit meer recht doen. Een van deze methodes is de methode van Halpin-Tsai, welke de volgende formule geeft:

$$E_{c,90} = 2 * (1 - V_m * v_m - V_f * v_f) * \left[(1 - C_c) * \frac{2 * C_m * C_f + K_c * G_m}{2 * K_{c,min} + G_m} + C_c * \frac{2 * C_m * C_f + K_c * G_f}{2 * K_{c,1} + G_f} \right] \quad [3]$$

Deze formule is niet alleen gebaseerd op de volumepercentages van de vezels en de harsen. Bij deze methode wordt er ook rekening gehouden met de ligging van de vezels (filament contiguity factor C_c).

De ligging van de vezels kunnen variëren van compleet geïsoleerde vezels (links in figuur 7) tot een compleet gesloten vezelnetwerk (rechts in figuur 7). In werkelijkheid zullen de vezels meer liggen zoals het middelste schema in figuur 7 weergeeft, wat dus een C_c geeft met een waarde tussen de 0 en 1. In de praktijk is gebleken dat deze waarde niet hoger wordt dan 0,4 en dat het meestal tussen de 0,2 en 0,3 ligt.



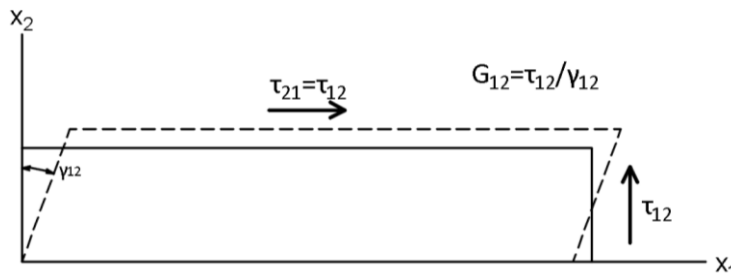
Figuur 7: filament contiguity factor C_c

Ook houdt de methode van Halpin-Tsai rekening met de poissonverhouding (ν). De poissonverhouding geeft de mate van dwarscontractie weer.

Met de E-modulus wordt de buigstijfheid bepaald. Naast de buigstijfheid is de afschuifstijfheid ook van belang. Deze wordt bepaald met een afschuivingsmodulus. De afschuivingsmodulus voor isotrope materialen kan worden bepaald door de volgende formule:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad [4]$$

Een assenstelsel bestaat uit 3 assen: de x_1 -, x_2 - en de x_3 -as. De methode van Halpin-Tsai is gebaseerd op een 2D assenstelsel en laat de x_3 -as vervallen.



Figuur 8

De schuifspanning in het x_1x_2 -vlak is afhankelijk van de bijhorende glijdingsmodulus G_{12} . Deze kan volgens de methode van Halpin-Tsai worden berekend met de volgende formule:

$$G_{12} = C_c * G_f * \frac{G_c + G_m}{G_{c,min} + G_f} + (1 - C_c) * G_m * \frac{G_c + G_f}{G_{c,min} + G_m} \quad [5]$$

Sterkte

VVK moet het hebben van zijn sterkte, dit komt door de vezels in het composiet. Dus hoe meer vezels, hoe sterker het eindproduct (tot een bepaald vezelpercentage). De vezels zijn vooral in de vezelrichting sterk, maar zoals inmiddels bekend verschilt dat per richting. Volgens de CUR 96 moet de sterkte worden bepaald en getoetst volgens de volgende waarden:

- Trekspanning in vezelrichting;
- Drukspanning in vezelrichting;
- Trekspanning loodrecht op de vezelrichting;
- Drukspanning loodrecht op de vezelrichting;
- Schuifspanning tussen deze twee richtingen.

De trek-, druk en schuifspanning wordt bepaald met de wet van Hooke, die er in dit geval zo uit ziet:

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^6 S_{ij} \sigma_j \quad [6]$$

Als er een rechtsdraaiend orthogonaal assenstelsel met een x_1x_2 -vlak wordt gekozen, kan er worden verondersteld dat de spanningen in de richting 3 en vlakken 4 en 5 gelijk zijn aan 0 ($\sigma_3=\sigma_4=\sigma_5=0$). In het geval van orthotropie waarbij het eerder genoemde vlak een symmetrievlak is, kan er ook worden verondersteld dat er geen afschuifstijfheid aanwezig is in de richtingen 1 en 2. Door deze uitgangspunten in te vullen in de matrix, kan deze worden vereenvoudigd tot:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad [7]$$

Hiermee kunnen vervolgens de trek- druk en schuifspanningen mee berekend worden. De Q_{ij} in de matrix staat voor 'de gereduceerde stijfheidsconstante van het vlak waarin de vlakspanningstoestand heerst' (Nijhof, 2004). Hiermee wordt de E-modulus met daarin een poisson-factor in verwerkt bedoeld. De poisson-factor van het composiet kan worden berekend met de volgende formule:

$$\nu_{12} = C_c * \frac{2 * C_m * C_f * \nu_c + \nu_{c,1} * G_f}{2 * C_m * C_f + \nu_{c,2} * G_f} + (1 - C_c) * \frac{2 * C_m * C_f * \nu_c + \nu_{c,1} * G_m}{2 * C_m * C_f + \nu_{c,2} * G_m} \quad [8]$$

Op basis van evenredigheid wordt de poisson-factor in de 21-richting bepaald.

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} E_2}{E_1} \quad [9]$$

Reële waarden voor de eigenschappen

De eigenschappen van VVK zijn niet zo gemakkelijk in een tabel te zetten, omdat het afhangt van een aantal factoren. Het is dus lastig ontwerpen als er geen vaste eigenschappen voor het materiaal zijn. Er wordt daarom eerst ontworpen met aannames, om later testen uit te voeren. In tabellen 2 en 3 zijn reële waarden voor de eigenschappen van de vezels en harses weergegeven.

Tabel 2: materiaaleigenschappen E-glas (Nijhof, 2004)

		E-glas
Dichtheid [kg/m ³]	ρ_f	2570
E-modulus [MPa]	E_f	73100
Poissonverhouding [-]	ν_f	0,24
Rekgrens [%]	$\epsilon_{1;t}$	2,0
	$\epsilon_{2;t}$	0,2
	$\epsilon_{1;c}$	1,2
	$\epsilon_{2;c}$	0,9
	γ_{12}	1,9
Lin. Therm. Uitz. coëff [10 ⁻⁶ /K]	α	5

Tabel 3: materiaaleigenschappen harsen (Nijhof, 2004)

		polyester	Vinylester	Epoxy
Dichtheid [kg/m ³]	ρ_f	1200	1100	1250
E-modulus [MPa]	E_f	3350	3350	3100
Poisson ratio [-]	ν_f	0,38	0,26	0,39
Rekgrens [%]	ϵ	1,8	2,2	2,5
Lin. Therm. Uitz. coëff [10 ⁻⁶ /K]	α	50-120	50-75	45-65

4. Bezwijkmechanismen

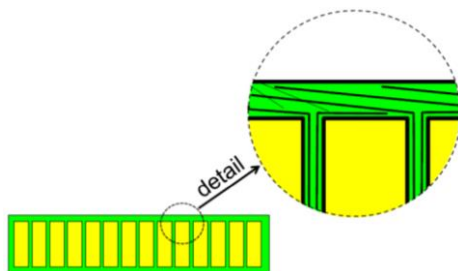
Door de eigenschappen van VVK is het materiaal gevoeliger voor sommige bezwijkmechanismen dan andere materialen. De vergelijking wordt voornamelijk gedaan met staal, omdat dit qua construeren veel op VVK lijkt. In de volgende paragrafen worden de relevante bezwijkmechanismen beschreven en wordt er een ontwerpoplossing gegeven voor het betreffende probleem.

Delaminatie

Net als bij het bezwijkmechanisme splijten gaat het VVK scheuren, bij delaminatie ontstaat de scheur tussen 2 lamellen. Dit ontstaat door schuifspanningen, die hoog kunnen oplopen. VVK's worden gevoelig voor delaminatie als 2 lamellen in dezelfde richting een groot verschil in stijfheid hebben. Een goed voorbeeld hiervan is een sandwichconstructie. Een sandwichconstructie is opgebouwd uit 2 stijve schillen en een zwakkere kern. Door het grote stijfheidsverschil tussen de schil en de kern, gaat er meer dwarskracht naar de schil. Hierdoor gaan de schil en de kern onderling van elkaar verschuiven.

Tussen de lamellen worden vaak geen versterkingen aangebracht. Om te voorkomen dat er delaminatie optreedt, kunnen er extra lagen worden aangebracht. Hierdoor worden de hoge schuifspanningen verdeeld tussen meer lamellen.

Een andere oplossing voor delaminatie is het toepassen van zogenaamde z-lagen. Het bedrijf InfraCore gebruikt deze techniek in alle sandwichconstructies. Met deze z-lagen worden de bovenhuid, de lijfplaten en de onderhuid met elkaar verbonden. Dit verkleint de kans op delaminatie enorm.



Figuur 9: z-lagen in een sandwichdek

Resonantie (comfort)

Resonantie is een verschijnsel dat wordt veroorzaakt door trillingen. Trillingen hebben sinusvormen, een volledige sinusvorm staat gelijk aan één periode. Het aantal van deze sinusvormen per seconde wordt de frequentie genoemd, uitgedrukt in Hz. Een brug heeft van zichzelf een bepaalde trilling, wat de eigenfrequentie wordt genoemd. Als een externe belasting op de brug komt te staan, kan het voorkomen dat deze een frequentie in de brug veroorzaakt die precies overeen komt met de eigenfrequentie van de brug. Hierdoor wordt de amplitude van de sinusvorm steeds groter, wat de brug oncontroleerbaar kan laten bewegen tot de brug bezwijkt. Een bekend voorbeeld hiervan is de 'Tacoma Narrows Bridge'.

De mate van resonantie wordt getoetst aan de hand van comforteisen. De EUR 23984 EN is een veelgebruikte richtlijn om deze comforteisen te bepalen. In deze norm wordt de versnelling van de brug berekend aan de hand van het verwachte aantal personen op de brug per tijdseenheid.

De versnelling van het brugdek kan met 3 methodes worden bepaald: de eindige elementen methode, één-massa-veer systeem en de respons spectra methode. In dit onderzoek wordt er gebruikt gemaakt van de laatst genoemde. De respons spectra methode is gebaseerd op de reactie van een schok. Bij deze methode worden er een aantal aannames gemaakt:

- De beschouwde trilvorm is de fundamentele trilvorm van het systeem;
- De stapfrequentie is gelijk aan de eigenfrequentie van de brug;
- De massa van de brug is gelijkmatig verdeeld;
- De trilvormen zijn sinusvormig;
- De eigentrilvormen hebben geen koppeling met elkaar;
- Het systeem gedraagt zich lineair-elastisch.

De versnelling van het brugdek wordt getoetst aan de comforteis die aangeeft wat de maximale versnelling mag zijn. Dit wordt a_{limit} genoemd. De optredende versnelling wordt a_{max} genoemd.

De optredende versnelling kan berekend worden met:

$$a_d = \Psi * a_{\text{max}} \quad [10]$$

$$a_{\text{max}} = k_{a,d} * \sigma_a \quad [11]$$

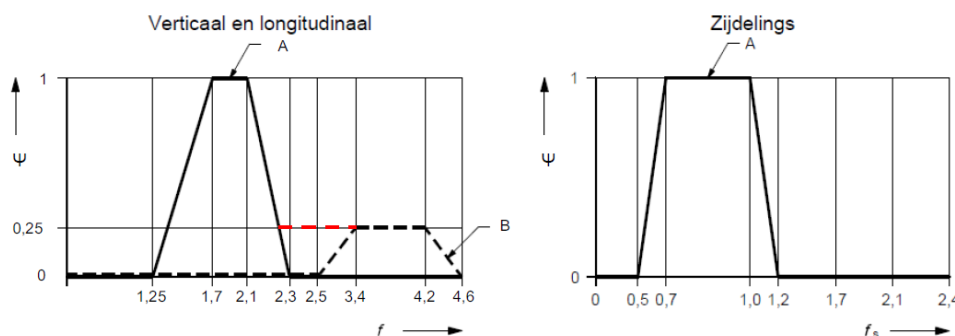
Waarin:

$k_{a,d} = k_{a,95\%} = \text{piekwaarde}$

$\sigma_a = \text{variantie van de versnelling van het brugdek}$

$\Psi = \text{reductiecoëfficiënt}$

De reductiecoëfficiënt is gebaseerd op de gevoeligheid voor resonantie van het brugdek. Deze kan worden afgelezen met figuur 10.



Figuur 10: Reductiecoëfficiënt Ψ (CUR commissie C 124, 2017)

Niet de gehele massa van de brug doet mee in het trillen van de brug. De geactiveerde massa in een bepaalde trilvorm kan worden bepaald met vergelijking 12.

$$m^* = \int_0^L \mu(\varphi(x))^2 dx \quad [12]$$

In de fundamentele trilvorm kan vergelijking 12 worden gegeneraliseerd naar vergelijking 13 als formule voor de modale massa van een tweezijdig scharnierend systeem.

$$m^* = 0,5\mu L \quad [13]$$

Knik

De knikstabiliteit voor een VVK constructie wordt nagenoeg op dezelfde manier als bij staal berekend.

Waar de opneembare belasting voor staal wordt bepaald door $A * f_{y,d}$, wordt de opneembare belasting van een VVK constructie bepaald door $A * \rho * f_{c,k}$. De ρ staat voor de reductiefactor voor het lokaal plooiën en lokale imperfecties van op druk belaste delen.

Per situatie kan er anders om worden gegaan met knik. De effecten van knik kunnen worden verkleind door bijvoorbeeld de kniklengte te verkorten of een sandwichconstructie toe te passen.

Kruip

Glas- en koolstofvezels zijn niet gevoelig voor kruip. Het probleem wordt veroorzaakt door de harsen, die wel kruipgevoelig zijn. In het verleden zijn er veel methodes ontwikkeld om de kruipvervorming van VVK te berekenen. Bekende methodes zijn: Findley, Boller en Nutting. Een andere methode is om de effecten van kruip mee te nemen met een conversiefactor, zoals de CUR 96 voorschrijft. Deze conversiefactor kan worden bepaald met vergelijking 14.

$$\eta_{ck} = \frac{1}{\Delta \varepsilon_k * t^n} \quad [14]$$

Hierin is n afhankelijk van het type vezelversterking. Indien de vezels liggen in de richting van de lange duur belasting geldt:

- $n = 0,01$ voor een UD-lamel
- $n = 0,04$ voor een weefsellamel
- $n = 0,10$ voor een mat-lamel

Door de ontwerpvrijheid kan de kruipgevoeligheid van de constructie zelf worden bepaald. Een voorbeeld hiervan is de 'Moreelsebrug', een fietsbrug over meerdere steunpunten die nu is uitgevoerd in staal. Een eis was dat de brug een strakke, rechte lijn moest zijn. Er is van de VVK-variant afgezien, omdat kruip ervoor zou kunnen zorgen dat de brug een sinusvorm kreeg. Hierdoor heeft de architect samen met de opdrachtgever gekozen om de brug in staal uit te voeren (Paauwe, 2017). Een andere oplossing hiervoor was om een samenstelling voor het composiet te kiezen wat minder kruipgevoelig is.

Vermoeiing

Bij het ontwerp van een VVK brug is in de meeste gevallen de stijfheid maatgevend voor de vormgeving van de brug. Vermoeiing wordt een probleem als een brug is ontworpen op sterkte. Als de stijfheid van een VVK brug voldoet, dan voldoet de sterkte met ruime mate ook. Hierdoor is VVK over het algemeen minder gevoelig voor vermoeiing dan staal.

Bij het ontwerp kan vermoeiing meegenomen worden met een conversiefactor η_{cf} . $\eta_{cf} = 0,9$ indien één van de volgende gevallen optreedt:

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

Als geen van deze situaties optreedt, dan hoeft vermoeiing niet meegenomen te worden in het ontwerp.

Schade door vocht

Een dun laagje hars als coating aanbrengen op composiet kan het brugdek beschermen tegen vochtschade. Een coating aanbrengen kan ook helpen tegen het voorkomen van UV-schade en erosie.

Bij het ontwerp van een VVK constructie worden de effecten van vocht meegenomen als conversiefactorfactor (η_{cv}). De waarde van η_{cv} bedraagt:

- 1,0 voor een VVK-constructie die zich vrijwel voortdurend in droge omstandigheden bevindt
- 0,9 voor een VVK-constructie die is blootgesteld aan wisselende vochtomstandigheden, waarbij droge en natte periodes elkaar afwisselen
- 0,8 voor een VVK-constructie die vrijwel voortdurend is blootgesteld aan vochtige omstandigheden (oppervlaktewater, grondwater, zeewater)

Schade door temperatuur en brand

De VVK constructie is zonder bescherming erg gevoelig voor brand. Er kunnen brandwerende maatregelen worden getroffen zoals:

- Het toepassen van fenolharsen. Deze soort hars is goed bestendig tegen temperaturen tot 200 °C
- Toevoegen van hulpstoffen en additieven
- Dikkere laminaten toepassen

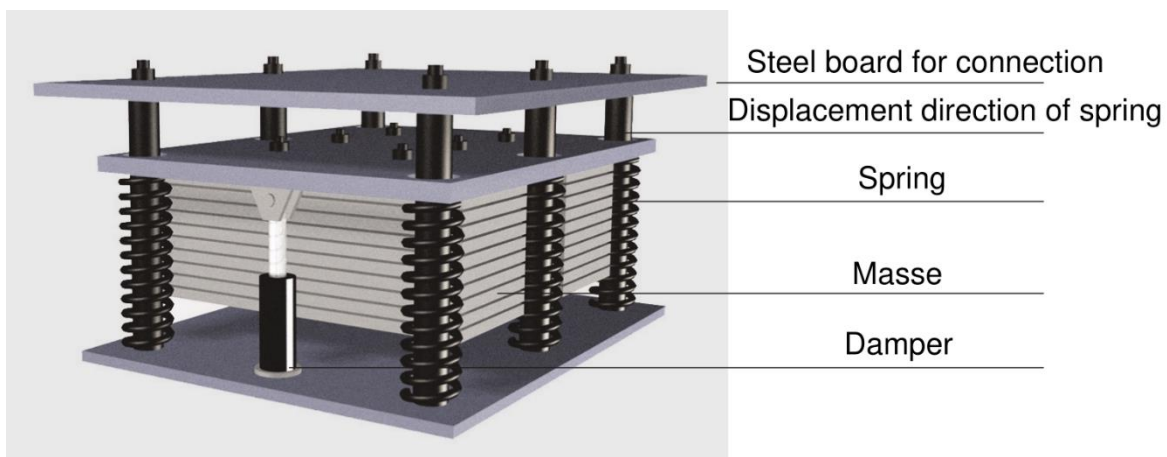
Uiteindelijk zal brand bijna altijd leiden tot het falen van de constructie. Ondanks dat kan er wel rekening worden gehouden met hogere temperaturen dan normaal. Hiervoor wordt er een conversiefactor voor temperatuurseffecten (η_{ct}) meegenomen in de berekening. De waarde voor η_{ct} bedraagt:

- 0,9 voor toetsen op bezwijken (UGT of vermoeiing)
- voor toetsen op vervormingen (BGT):
 - 1,0 voor een maximale gebruikstemperatuur $T_d \leq T_g - 40$ graden
 - 0,9 voor een maximale gebruikstemperatuur $T_g - 40$ graden $< T_d < T_g - 20$ graden

Impactschade en vandalisme

Een impactbelasting kan worden veroorzaakt door bijvoorbeeld door aanrijding. Staal deukt in bij deze belasting, maar bij VVK is dit niet het geval. VVK is in vergelijking met staal namelijk een erg bros materiaal. Ook heeft VVK een elastisch materiaalgedrag, waardoor de constructie niet vervormt. Hierdoor is de schade moeilijk te inspecteren. Voor de nodige inspectie is het van belang dat de constructie toegankelijk is aan beide zijden van het laminaat.

Een ander mogelijk scenario is dat vanden op de brug gaan springen. Dit zorgt voor ongewenste trillingen in het brugdek wat kan gaan resoneren. Om dit op te vangen kunnen er trillingdempers in het brugdek worden geplaatst, ook wel een tuned mass damper (TMD) genoemd. Een TMD loopt een halve periode voor op dezelfde frequentie als de vanden. Dit zorgt dus dat de trillingen worden opgeheven. Een TMD is voor één frequentie toe te passen. Dit betekent dat als er meerdere kritische frequenties op kunnen treden die ver uit elkaar liggen, dat er voor elke frequentie een TMD toegepast moet worden.



Figuur 11: TMD (bron: <http://www.roadjz.com/>)

5. Verschil met andere materialen

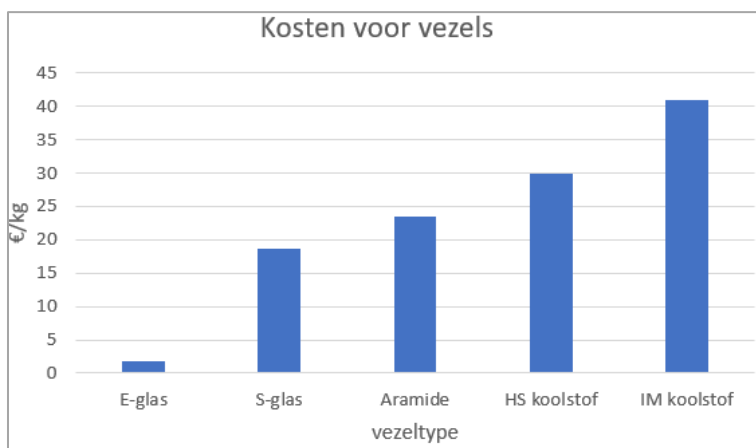
VVK heeft, zoals eerder in dit hoofdstuk behandeld, veel verschillende eigenschappen. Om de voordelen van VVK bij het ontwerp van een fietsbrug te vinden, moet er eerst een vergelijking worden gemaakt met bestaande constructiematerialen. De eigenschappen van constructiematerialen die worden vergeleken met de eigenschappen van VVK zijn:

- Staal
- Staalbeton
- Gewapend beton
- Lichtbeton
- Ultra Hoge Sterkte Beton (UHSB)
- Hout
- Aluminium legeringen

Van elk van deze materialen zal een vergelijking worden gemaakt in de eerder behandelde faalmechanismes die op kunnen treden bij VVK, de kosten en materiaaleigenschappen

VVK is in de civiele wereld een relatief nieuw constructiemateriaal. Het is vooralsnog geen goedkoop materiaal als je het vergelijkt met staal, beton en hout. De kosten van een VVK constructie hangen niet alleen af van de prijs van de vezels en harsen, maar ook van de productie. Er zijn bijvoorbeeld kostbare mallen nodig. Als deze mallen vaker gebruikt kunnen worden scheelt dat al in de totale kosten. Echter zal een fietsbrug met een overspanning van 100 meter niet zo vaak neergelegd worden, waar dus rekening mee gehouden moet worden bij de keuze van het composiet.

Er kunnen verschillende vezels in het composiet worden gebruikt. De meest gebruikte vezel in de bouw zijn E-glasvezels. De 'E' staat voor elektrisch. Glasvezels zijn tot op zekere hoogte op gewenste eigenschappen te produceren. C-glas is bijvoorbeeld goed bestand tegen chemische stoffen, waardoor het goed toe te passen is in rioolbuizen. S-glas is dan weer vergelijkbaar met E-glas met verbeterde sterkte- en stijfheidseigenschappen.



Figuur 12: kosten voor vezels (Gurit, 2017)

Uit figuur 12 blijkt dat als er gekozen wil worden voor vezels met een hoge stijfheid, dat de kosten al snel een factor 10 groter worden. Bij een fietsbrug met een overspanning van 100 meter zal het in de meeste gevallen niet rendabel zijn om voor vezels te kiezen met betere eigenschappen. In dit onderzoek wordt er verondersteld dat er E-glasvezels gekozen moet worden.

Voordelen van VVK:

- Hoge sterkte
 - Slanke constructies mogelijk
- Ontwerpvrijheid (in opbouw composiet en vormgeving constructie)
- Goed bestand tegen vermoeiing
- Laag eigen gewicht
- Weinig onderhoud nodig / lange levensduur
- Kruip afhankelijk van de opbouw van het composiet, maar over het algemeen goed bestand tegen kruip

Nadelen van VVK:

- Relatief lage stijfheid
 - Gevoelig voor knik
 - Gevoelig voor trillingen en doorbuigingen
- Gevoelig voor splijten en delaminatie
- Relatief duur, in bruggen is de keuze voor glasvezels bijna geforceerd omdat koolstof te duur is.
- VVK vervormt niet plastisch: geen waarschuwing wanneer VVK faalt

Materiaaleigenschappen

Een tuibrug met een overspanning van 100 meter vraagt veel van het materiaal, vooral op het gebied van stijfheid. Wanneer een VVK dek op stijfheid wordt ontworpen betekent dat voor VVK dat er een hoog vezelvolumepercentage moet worden toegepast. Ook kunnen alle vezels niet in één richting liggen, maar ten behoeve van de stijfheid wordt ervoor gekozen om een groot deel van de vezels in de overspanningsrichting te leggen.

In tabel 4 worden de eigenschappen gegeven van een composiet van E-glasvezels en polyesterhars. 80% van de vezels worden in de overspanningsrichting gelegd en 20% dwars daarop. Het vezelvolumepercentage ligt op 60%. Dit composiet kan worden weergegeven als:

E-glas/polyester, 0° (80°)/90° (20%), $v_f = 0,6$

Tabel 4: E-glas/polyester, 0° (80°)/90° (20%), $v_f = 0,6$

		E-glas/polyester, 0° (80°)/90° (20%), $v_f = 0,6$
Dichtheid [kg/m³]		2022
Vezelrichting	Poisson ratio ν_{12}	0,23
	Stijfheid $E_{c,0}$ [MPa]	38072,28
	Treksterkte $\sigma_{t,1}$ [MPa]	699,26
	Druksterkte $\sigma_{c,1}$ [MPa]	454,31
Loodrecht op vezelrichting	Poisson ratio ν_{21}	0,11
	Stijfheid $E_{c,90}$ [MPa]	17709,13
	Treksterkte $\sigma_{t,2}$ [MPa]	208,23
	Druksterkte $\sigma_{c,2}$ [MPa]	263,97
Afschuiving	Modulus G_{12} [MPa]	5779,10
	Sterkte τ_{12}	109,80
Thermische uitzetting	α_1 [$10^{-6}/K$]	6,0
	α_2 [$10^{-6}/K$]	29,5

Verschillen van VVK met andere materialen

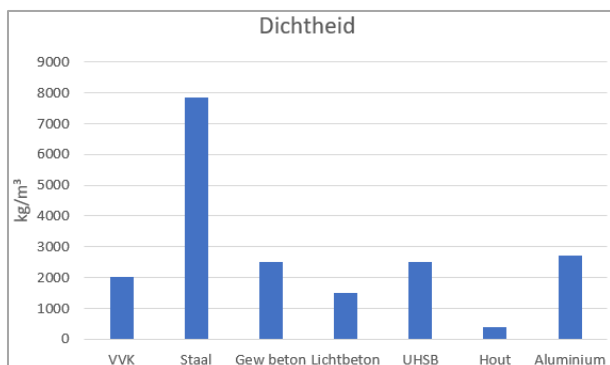
Bij het ontwerp van een fietsbrug van 100 meter zijn de volgende constructieve materiaaleigenschappen van belang:

- De dichtheid van het materiaal: Met een overspanning van 100 meter kan een brug flink wat gaan wegen. Als er gekozen kan worden voor een licht materiaal scheelt dit enorm in het totale gewicht van de constructie. Het totale gewicht van de constructie gaat samen met de eigenschappen van het gekozen materiaal. Als er namelijk een heel licht materiaal wordt gekozen, maar de eigenschappen zijn slecht, dan wordt de constructie dik wat het ook zwaarder maakt.
- De sterkte van het materiaal: hoe sterker het materiaal, des te slanker het materiaal als de sterkte berekening maatgevend is.
- De stijfheid van het materiaal: Als doorbuigingen maatgevend zijn is het van belang dat er een stijf materiaal wordt gekozen.
- De lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt: In de formule voor de uitzetting van een constructie zit de parameter lengte L verwerkt. Hoe langer de constructie, hoe groter de uitzetting. Het is daarom niet onbelangrijk om voor een materiaal te kiezen met een lage lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt.

Naast de constructieve materiaaleigenschappen zijn ook de volgende ontwerpaspecten van belang:

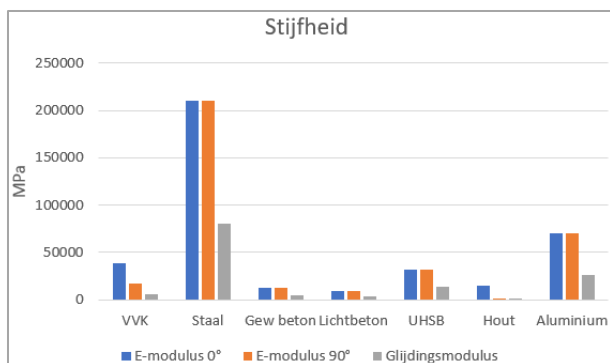
- Kosten: Ondanks de keuze op basis van constructieve materiaaleigenschappen moet de constructie ook betaalbaar blijven.
- Duurzaamheid: Dit aspect wordt steeds belangrijker. Dit is daarom ook onderdeel van de EMVI criteria bij een inschrijving van een project. Een duurzamer ontwerp kan het soms winnen van een goedkoper ontwerp.
- Randvoorwaarden van het project: Als bijvoorbeeld de eis is dat er slank gebouwd moet worden, vallen sommige materialen al af, ondanks dat ze eventueel goedkoper en/of duurzamer zijn.

De materiaalkeuze van een fietsbrug van 100 meter is in de meeste gevallen afhankelijk van het best scorende materiaal op dichtheid en stijfheid.



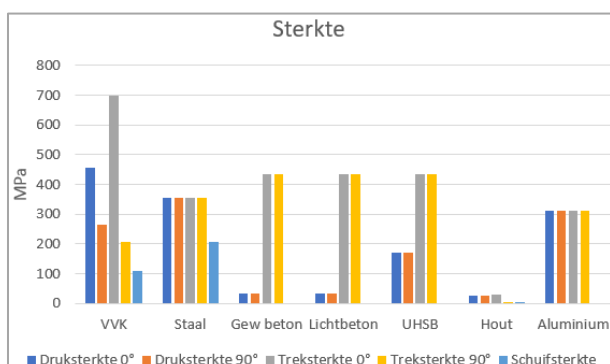
Figuur 13: dichtheid materialen

De dichtheid van het materiaal zegt niet alles over het uiteindelijke gewicht van een brug. Van beton is er veel meer materiaal nodig dan staal, waardoor een betonnen brug vaak zwaarder uitvalt dan een stalen brug. Samen met andere constructieve materiaaleigenschappen kan er iets worden gezegd over het gewicht van een brug.



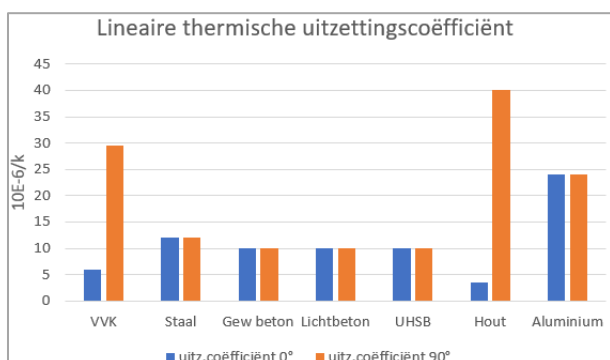
Figuur 14: Stijfheid materialen

Stijfheid is een zeer belangrijk aspect als het gaat om een brug van 100 meter. In figuur 14 is te zien dat staal verreweg het stijfste materiaal is. Liggerbruggen met grote overspanningen worden dan ook vrijwel altijd van staal gemaakt.



Figuur 15: sterkte materialen

In figuur 15 is te zien dat VVK in de overspanningsrichting de beste sterkte eigenschappen heeft. Staal kan goed concurreren met VVK op het gebied van sterkte, zeker als er een hogere staalkwaliteit wordt gekozen. Maar er moet niet vergeten worden dat staal bijna 4 keer zoveel weegt. Hierop wint VVK het dus van staal. Wat ook goed concurreert met VVK is UHSB. In druksterkte heeft UHSB iets minder capaciteit, maar bij een UHSB fietsbrug van 100 meter zal de stijfheid maatgevend zijn. Als de stijfheid voldoet, dan voldoet de sterkte ook. Ook qua dichtheid zit VVK dicht in de buurt van UHSB. Maar er is te concluderen dat VVK qua sterkte beter scoort dan UHSB. Hetzelfde geldt voor aluminium legeringen, VVK scoort net wat beter op het gebied van sterkte



Figuur 16: lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt materialen

De lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt is van belang bij bruggen met een grote overspanning, omdat het materiaal een groot stuk kan uitzetten als de brug langer wordt. In de formule voor de uitzetting van een constructie zit namelijk de parameter lengte L in verwerkt. Het is daarom niet onbelangrijk om voor een materiaal te kiezen met een lage lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt.

Antwoord op deelvraag 2

Karakteristiek voor VVK is dat het een lage stijfheid heeft ten opzichte van staal. Dit maakt dat, in tegenstelling tot staal, doorbuigingen vaker maatgevend zijn voor de vormgeving van een fietsbrug. De stijfheid van composiet kan worden bepaald door de mengselregel. Dit geeft echter niet een reëel beeld van de E-modulus. De methode van Halpin-Tsai komt beter overeen met de testresultaten van VVK.

In tegenstelling tot de stijfheid van VVK, is de sterkte van het materiaal in vergelijking met staal erg hoog. Dit is in het ontwerp te beïnvloeden door er meer of minder vezels in de stoppen. De sterkte van VVK kan worden bepaald aan de hand van de wet van Hooke.

VVK is erg gevoelig voor de volgende faalmechanismen:

- Delaminatie
- Resonantie
- Knik in profielen

Daarnaast kan er impactschade, schade door vocht of schade door brand of temperatuur optreden. Hier dient rekening mee gehouden te worden in het ontwerp. Voor constructieve faalmechanismen zijn er conversiefactoren om het effect van kruip, vermoeiing, vocht en temperatuur op te vangen.

Kiezen voor VVK is niet direct de goedkoopste oplossing, maar er zijn wel kosten te besparen op bijvoorbeeld installatiekosten en onderhoudskosten. Als er voor VVK als constructiemateriaal gekozen wordt voor een fietsbrug met een overspanning van 100 meter, dan moet er rekening worden gehouden met de volgende materiaaleigenschappen:

- Dichtheid
- Stijfheid
- Sterkte

De verhouding van sterkte en dichtheid is bij VVK erg hoog. Als dit vergeleken wordt met beton steekt VVK er ruim bovenuit. Deze verhouding is zelfs ten opzichte van staal bijna 4 keer zo groot. Er valt dus te concluderen dat met VVK zeer licht geconstrueerd kan worden. Maar aan een lichte constructie heb je niks als de stijfheid te laag is voor een overspanning van 100 meter. Het is dus van belang dat hier slim mee om wordt gegaan bij de brugtypekeuzes van een VVK fietsbrug met een overspanning van 100 meter.

6. VVK in een tuibrug

De tuien

De tuien van een tuibrug houden het brugdek vast en beperken daarmee de doorbuiging van het dek. Te veel vervorming en doorbuiging in een brugdek is ongewenst en kan bovendien oncomfortabele trillingen veroorzaken. De uitrekking van de tuien hangen direct samen met de doorbuiging en trillingen van het brugdek. De uitrekking van de tuien kan volgens de wet van Hooke verminderd worden door een stijver materiaal te kiezen en/of de doorsnede-oppervlak te vergroten.

Het nut van de hars in het composiet is om de vezels bij elkaar te houden en de belastingen over te brengen naar de vezels. Hierdoor kan het composiet dwarskrachten en momenten opnemen, terwijl de vezels los dat niet kunnen. In tuien zullen alleen trekkracht optreden en geen dwarskracht en momenten. Hierdoor heeft het geen nut om de hars toe te voegen aan de vezels wanneer het gebruikt wordt in tuien.

Glasvezels hebben in verhouding met staal een veel lagere E-modulus, wat het niet aantrekkelijk maakt om te gebruiken in de tuien. Koolstofvezels hebben daarentegen een erg hoge E-modulus, maar het is simpelweg te duur. Wat wel een mogelijke optie is, is om aramidevezels te gebruiken. Aramide wordt vaker gebruikt in kabels en heeft laten zien dat het goed functioneert. Een groot nadeel van aramide is dat het erg gevoelig is voor kruip. Daarnaast is aramide minder stijf is dan staal. Hierdoor zullen de tuien meer gaan doorhangen.

In dit onderzoek wordt er aangenomen dat de voordelen van aramide tuien niet afwegen tegen de constructieve gevolgen in de brug van deze tuien. Hetzelfde geldt voor glasvezel en koolstof tuien en daarom zullen dezelfde tuien als de bestaande brug worden aangehouden.

Modelering van de tuien

De uitrekking van de tuien hebben invloed op de eigenfrequentie van het de tuien zelf, maar ook het brugdek. Wanneer er weinig spanning op de tuien staat, zullen deze gaan doorhangen. Dit zorgt voor lagere eigenfrequenties van de tuien, wat het gevoelig maakt voor resonantie. De EA van de tuien kunnen de eigenfrequentie van het brugdek beïnvloeden. Bij een lage EA zal de eigenfrequentie van het brugdek lager liggen dan wanneer de tuien een hoge EA hebben.

Om de eigenfrequentie van het brugdek te bepalen worden het dek gemodelleerd als een ligger op 2 steunpunten met verende opleggingen ter plaatse van de tuaansluitingen. Hiervoor is een k-factor nodig die in het model ingevoerd moet worden. Volgens de wet van Hooke is de k-factor van een staaf die in de lengterichting van de staaf belast wordt gelijk aan vergelijking 15.

$$k = \frac{EA}{L} \quad [15]$$

In het geval van een tuibrug zal de belasting niet in dezelfde richting als de tuien aangrijpen. Volgens het rapport 'tuibruggen in voorgespannen beton' van J. Brakel mag de k-factor berekend worden met behulp van krachten ontbinden. Dit geeft vergelijking 16 als formule voor de in te voeren k-factor in het rekenmodel.

$$k' = \frac{EA}{L} \cos \alpha \quad [16]$$

De rekenwaarde van de E-modulus van de tuikabels zijn niet hetzelfde als de E-modulus van staal. Deze waarde hangt af van de spanning in de tuien en kan worden berekend met de formule van Ernst (vergelijking 17).

$$E_F = \frac{E_0}{1 + \frac{100 * L_{hor}^2 * \rho^2 * E_0}{12 * \sigma^3}} \quad [17]$$

Waarin:

E_F = fictieve E – modulus tuien [MPa]

E_0 = startwaarde E – modulus [MPa]

L_{hor} = horizontale project van de tui [mm]

De startwaarde hangt af van het type kabel. Uit deze formule is af te leiden dat wanneer de spanning in de tui lager wordt, de fictieve E-modulus van de tui ook lager wordt.

De tuiverspanning, de permanent belasting in de tuien ten gevolge van het eigen gewicht, wordt in het rekenmodel meegenomen door een verkorting van de tuien. Dit wordt door middel van een negatieve temperatuurbelasting aangebracht. De verlenging van de tuien onder het eigen gewicht kan worden berekend met de wet van Hooke. Door deze verlenging in te vullen in vergelijking 18 kan de negatieve temperatuurslast worden bepaald.

$$\Delta l = \alpha * l * \Delta T \quad [18]$$

Waarin:

α = lineaire uitzettingscoëfficiënt

ΔT = temperatuursverschil [K]

Op de verankeringstuinen wordt extra voorspanning gezet. Dit wordt bepaald door in het rekenmodel een belasting op de landhoofden te plaatsen en de opleggingen t.p.v. de landhoofden in de z-richting vrij te maken. In bijlage II wordt dit nader toegelicht en uitgerekend voor de bestaande ringvaartplasbrug.

Eigenfrequentie van de tuidraden

De trillingen in tuibruggen hebben al meerdere malen laten zien dat het tot problemen kan leiden. Niet alleen de trillingen in het brugdek, maar ook de trillingen in de tuidraden kunnen tot problemen leiden. Een bekend voorbeeld hiervan zijn de tuidraden van de Erasmusbrug. Doordat een laagje water aan de tuien bleef plakken veranderde dit de doorsnede van de tuien. Hier werd bij het ontwerp niet op gerekend en de tuien gingen resoneren. Uiteindelijk is dit opgelost door nieuwe trillingsdempers te plaatsen op de tuien, maar er zijn hier ook bruggen op ingestort. De resonantie van de tuidraden wordt buiten dit onderzoek gelaten, maar het is zeker een aandachtspunt om op door te gaan.

De eerste en laagste eigenfrequentie van de tuidraden is te bepalen met vergelijking 19. De eigenfrequentie kan ook worden bepaald met een rekenmodel.

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma_{tui}}{\rho_{tui}}} \quad [19]$$

Waarin:

σ_{tui} = spanning in de tui [MPa]

ρ_{tui} = soortelijk gewicht van de tui [kg/m³]

De pyloon

De vorm van de pyloon kan erg verschillen, dit hangt van de randvoorwaarden van de brug en de ontwerpkeuzes. Zo is een van die ontwerpkeuzes of er één of meerdere pylonen worden gebruikt. Als er wordt gekozen om één pyloon te gebruiken zijn daar nog verschillende varianten op. Zo kan er een pyloon worden gebruikt die is toegepast bij de ringvaartplasbrug in Rotterdam. Bij deze brug is er in het midden een schuine buis aangebracht die gestabiliseerd wordt door een tui. Een ander voorbeeld waarbij een enkele pyloon in het midden staat is de 'Swansea Sail Bridge'. Hier is er echter voor gekozen om een recht staande pyloon toe te passen.

Bij de tuibrug voor de 'ParkShuttle' tussen metrostation Kralingse Zoom en Rivium is de pyloon ook centrisch plaatst in zowel de lengte- als de breedterichting.



Figuur 17 en 18: Swansea Sail Bridge en 'ParkShuttle' brug (bron: <http://www.newsteelconstruction.com> en <http://static.panoramio.com>)

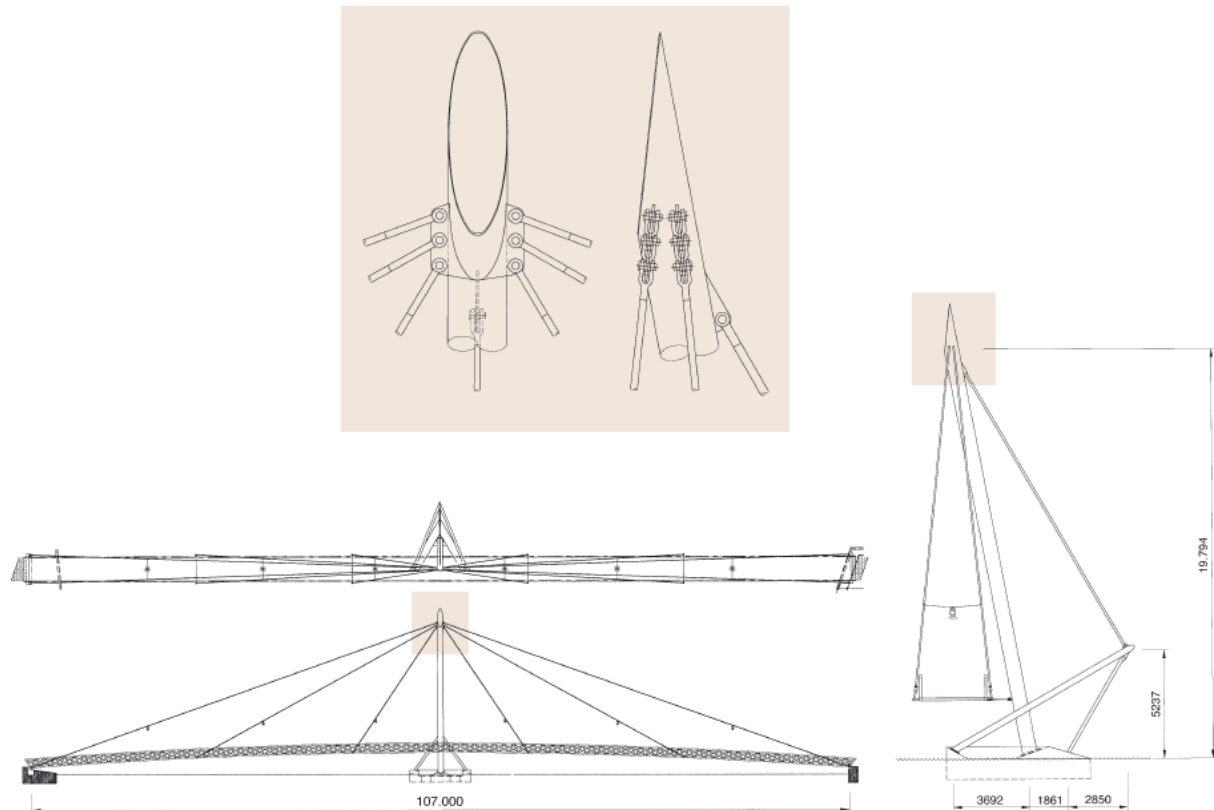
Ook kan worden gekozen om de pyloon uit het midden te halen, zoals de 'passerelle du palais de justice'. Bij deze brug is ook de vorm van de pyloon aangepast, waardoor de pyloon centrisch staat ten opzichte van het brugdek. Een ander mooi voorbeeld hiervan is de 'Heibrök' in Stein. Net als bij de 'passerelle du palais de justice' staat de pyloon in de lengterichting uit het midden van de brug. In beide gevallen wordt de pyloon aan de zijde van de korte overspanning verankerd, door middel van een verankeringstui en een eindtuit, aan het landhoofd.



Figuur 19 en 20: passerelle du palais de justice en Heibrök (bron: <http://mlegras.free.fr> en <http://www.nationalestaalprijs.nl>)

De pyloon van de ringvaartplasbrug

De pyloon van de ringvaartplasbrug is opgebouwd uit een stalen buisprofiel als mast van de pyloon, 2 stalen buisprofielen als schoren, een trekstang en een tui om de punt van de pyloon de stabiliseren.



Figuur 21: Ringvaartplasbrug tekening

Het maatgevende faalmechanisme van de pyloon is in de meeste gevallen knik. In het geval van de ringvaartplasbrug wordt de mast van de pyloon belast op druk en buiging. Echter heeft de buiging in verhouding met de druk weinig invloed. Het profiel wordt op knik getoetst op de plek waar de uitbuiging maximaal is. Dit zal ongeveer op de helft van het profiel zijn. Omdat het moment weinig invloed heeft op de stabiliteit van het profiel, wordt er volstaan met het nemen van de helft van het optredend moment ter plaatse van de inklemming. De schoren worden alleen op druk belast, als de effecten van het eigen gewicht worden verwaarloosd.

De knik van een VVK profiel wordt nagenoeg op dezelfde manier berekend als een stalen profiel. In een VVK profiel wordt er ook nog rekening gehouden met plooi en plaatimperfecties. Dit wordt verwerkt in de formule van de relatieve slankheid (vergelijking 20).

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A \cdot \rho \cdot f_{c,k}}{N_{cr}}} \quad [20]$$

Waarin:

ρ = reductiefactor voor het lokaal plooi en lokale imperfecties van op druk belaste staven

$$\rho = \frac{f_{c,stab,k}}{f_{c,k}} \leq 1,0 \quad [21]$$

$f_{c,stab,k}$ = karakteristieke druksterkte rekening houdend met plooi en plaatimperfecties

$f_{c,k}$ = karakteristieke druksterkte van de staaf in de richting van de staafas

$f_{c,stab,k}$ is afhankelijk van de mate van de buigstijfheid van het profiel. Deze kan worden bepaald door middel van een vereenvoudigd D-matrix. De elementen van de D-matrix moeten worden berekend met de rekenwaarden van de materiaalstijfheden ($E_{c,1}$, $E_{c,2}$ en G_{12}).

De mast van de pyloon voldoet bij een profiel van Ø850-50 en de schoren bij een profiel van Ø530-30. In tabel 5 is weergegeven met welke parameters er is gerekend bij de toetsing op stabiliteit.

Tabel 5

	$f_{c,stab,k}$ [MPa]	P [-]	N_{cr} [kN]	λ_r [-]	Φ [-]	χ [-]
Ø850-50	301	1,0	16808	1,50	1,82	0,35
Ø530-30	279	1,0	4339	1,74	2,26	0,27

Een buisprofiel is niet gevoelig voor kip, dus wordt de reductiefactor ten gevolge van kip (X_{LT}) niet meegenomen in de berekening.

Uit de controles volgen dat het buisprofiel Ø850-50 een unity check heeft van 0,90 en het buisprofiel Ø530-30 een unity check van 0,94.

De kosten

De kosten van een VVK constructie hangt af van de laminaatopbouw en productiemethode van het VVK. Veel profielen van VVK worden vervaardigd met de pultrusie techniek. Het nadeel van deze methode is dat de machine de grootte van de profielen limiteert. De berekende profielen van de pyloon zijn zodanig groot, dat er een andere productiemethode gekozen moet worden. Een goed alternatief is de productiemethode wikkelen. Het Rotterdamse bedrijf Jules Dock is, op het moment van dit onderzoek, bezig met het ontwerpen van windturbines van VVK. Dit bedrijf maakt hierbij gebruik van de productiemethode wikkelen. Met behulp van dit bedrijf zijn de globale kosten geschat voor de berekende VVK pyloon. De kosten van zowel het hars als de vezels liggen op ongeveer €5 per kilogram materiaal.

De productie is nog een lastig punt. Momenteel heeft het bedrijf Jules Dock niet de juiste apparatuur om zulke profielen te maken. Dit heeft ook te maken met het gewicht van de pyloon. De mast van de pyloon weegt ongeveer 240 kg per meter. Dit zorgt voor grote doorbuiging als het profiel gemaakt wordt (over de lengte van 20 meter). Een oplossing hiervoor is om het profiel in delen te maken en achteraf aan elkaar te bevestigen.

In tabel 6 zijn de prijzen te zien van de stalen buisprofielen de en VVK buisprofielen. In de productieprijs van het VVK is de complexiteit van het maken van het profiel en het kernmateriaal verwerkt.

Tabel 6

		Lengte [m]	Opp./m ¹ [m ²]	Soort. Gew. [kg/m ³]	Prijs/kg	Productieprijs	Totale prijs
Stalen pyloon	Ø711-20	± 20000	0,043	7850	€4	€13.500	€40.000
	Ø273-16	± 10000	0,013	7850	€4	€4.000	€12.000
VVK pyloon	Ø850-50	± 20000	0,126	1912	€5	€20.000	€44.000
	Ø530-30	± 10000	0,047	1912	€5	€15.000	€33.000

De materiaal- en productiekosten zijn voor de VVK buisprofielen duurder dan de stalen buisprofielen. Hier zijn de onderhoudskosten niet in meegenomen. Gewoon staal heeft veel onderhoud nodig, terwijl VVK onderhoudsarm is. Er zijn wel maatregelen te nemen tegen de corrosie van staal, waardoor er minder onderhoud nodig is.

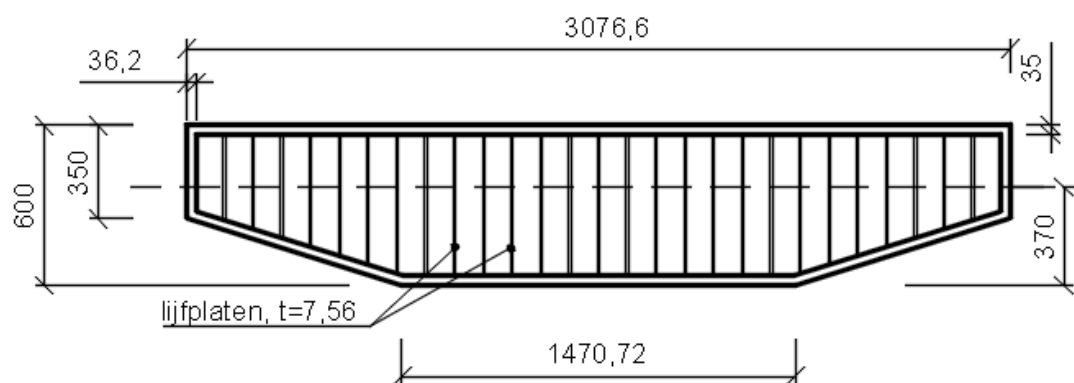
Het brugdek

Brugdekken bestaan er in allerlei vormen, elk aangepast op het materiaal. Om een voorbeeld te geven: een plaatbrug is heel goed in beton te maken, maar in staal is het niet efficiënt. Het voordeel van VVK is dat het bijna elke vorm wel kan aannemen. In dit onderzoek wordt een simpele plaatbrug, in de vorm van een sandwichconstructie, vergeleken met een trogconstructie. Dit geeft dus de vraag: is het rendabel om de leuning samen te laten werken met het brugdek om de stijfheid te verhogen?

Er zijn meerdere trogconstructies bekeken, waaruit geconcludeerd kan worden dat de leuning in het VVK dek verwerken een stuk duurder is dan wanneer de leuning vast gemaakt wordt met bouten. Dit heeft voor VVK te maken met de complexiteit van de constructie. Voor staal heeft dit te maken met het onderhoud van de leuning. Als de leuning geïntegreerd wil worden in het brugdek, wordt de leuning te groot om het thermisch te verzinken. Dit zorgt voor veel onderhoud aan de leuning.

Sandwichconstructie

Het dek heeft een hoogte van 600 mm en bij de zijanten een hoogte van 350 mm. Er is voor deze opbouw gekozen omdat de minimale benodigde hoogte, ten gevolg van dwarskracht op de lijven, 350 mm is. Echter heeft een dek van 350 mm hoogte over de gehele breedte niet genoeg stijfheid. Daar dient de verhoging naar 600 mm voor. Door de (dikke) huid verder van de neutrale lijn te plaatsen, wordt het traagheidsmoment verhoogd volgens de regel van Steiner. De randen zijn relatief dik. Hier is voor gekozen omdat de rand de leuning moet kunnen dragen.



Figuur 22: sandwichconstructie

Comfort

Met een sandwichconstructie zal het brugdek altijd gevoelig zijn voor resonantie volgens de EUR 23984 EN. Dit komt omdat de waarde van 2,3 Hz niet te behalen valt met deze constructie. Deze waarde valt namelijk net buiten het gebied waar de kans op resonantie kan optreden (figuur 10). Op zichzelf is dit nog niet direct een probleem, het wordt pas een probleem als de comforteisen worden overschreden. Wat wel een bijkomend nadeel is, is dat er meer TMD's toegepast moeten worden, vanwege de meerdere lage eigenfrequenties in het brugdek (zie hoofdstuk 4, paragraaf 'impactschade en vandalisme'). Dit brengt vanzelfsprekend extra kosten met zich mee.

De fundamentele eigenfrequentie wordt aangenomen op 2,107 Hz. Deze waarde ligt in de piek van figuur 10 wat het dus erg gevoelig maakt voor resonantie. De resonantie wordt getoetst aan het comfort van de bruggebruiker zoals staat beschreven in hoofdstuk 4 onder de paragraaf 'Resonantie'. Er worden naar 3 situaties gekeken:

1. De situatie dat de brug vol met mensen staat. Dit zal slechts een aantal keer in de levensduur van de brug voorkomen
2. De situatie dat er een groep mensen/kinderen over de brug gaan. De brug ligt naast een basisschool en daarom wordt de kans geschat dat deze situatie wekelijks voor kan komen.

3. De situatie dat er 15 personen op de brug lopen. Dit zal dagelijks voorkomen.

De dempingsverhouding is materiaalafhankelijk. De CUR 96 geeft aan dat de gemiddelde dempingsverhouding voor een VVK constructie 1% is. Deze waarde is puur voor het materiaal zelf, maar bij de damping speelt alles mee wat aan of in de brug zit. Een stalen leuning of zelfs een klein boutje verhogen de dempingsverhouding. De werkelijke dempingsverhouding voor een VVK constructie ligt dus hoger. In dit onderzoek wordt er een waarde van 2% aangehouden. Dit is een veilige waarde als er rekening wordt gehouden met de complexiteit van een tuibrug en het ontwerp er van.

De constanten en uitgangspunten worden uit de EUR 23984 EN gehaald. De situatie voldoet wanneer de optredende versnelling lager is dan a_{limit} . Situatie 1 wordt als volgt berekend:

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $2,5 \text{ m/s}^2$

$$d = 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 321 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 973,5 * 107 = 52,08 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 7 * 10^{-3} * 321 = 2,25$$

$$k_1 = -0,07 * 2,107^2 + 0,56 * 2,107 + 0,084 = 0,95$$

$$k_2 = 0,004 * 2,107^2 - 0,045 * 2,107 - 1 = -1,1$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{0,95 * 0,01^{-1,08} * \frac{3,7 * 2,25^2}{52,08^2}} = 0,47$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,80 * 0,47 = 1,73 \text{ m/s}^2 < 2,5 \text{ m/s}^2 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

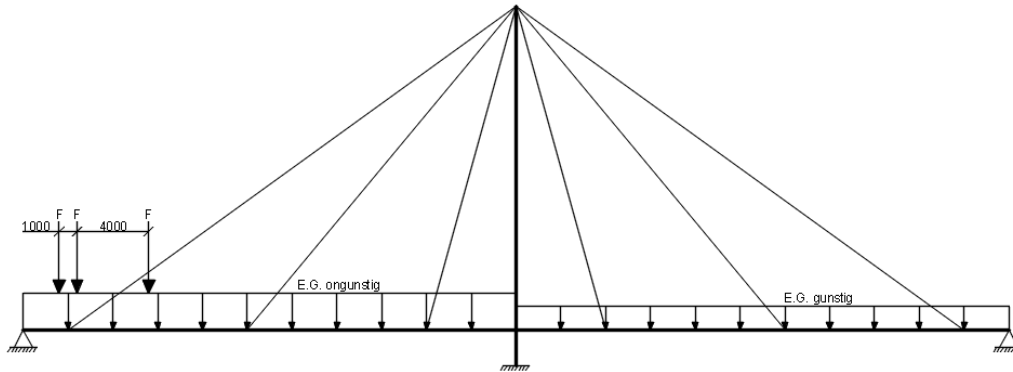
De andere situatie zijn weergegeven in tabel 7

Tabel 7

	a_{limit} [m/s ²]	d [personen]	m^* [t]	σ_F	k_1	k_2	σ_a	a_{max} [m/s ²]
Situatie 2	1,0	64,2	52,08	0,77	1,02	-1,07	0,24	$0,93 < 1,0$
Situatie 3	0,5	15	52,08	0,18	1,02	-1,07	0,12	$0,45 < 0,5$

Sterkte

De huiden van de sandwichconstructie worden getoetst op moment. Deze zullen altijd wel voldoen wanneer de constructie voldoet aan de conform eisen. De lijfplaten worden getoetst op normaal- en dwarskracht. De dwarskracht is in bijna alle gevallen maatgevend. Dit komt doordat er wordt gerekend met dienstvoertuigen op de brug die ter plaatse van de wielen een geconcentreerde belasting veroorzaken (figuur 23).



Figuur 23: maatgevende belastingcombinatie voor de dwarskracht

Uit een rekenmodel blijkt dat figuur 23 de maatgevende belastingcombinatie is voor dwarskracht. De optredende dwarskracht in dit geval bedraagt 51,92 kN. De dwarskracht wordt als volgt getoetst:

Opneembare spanning

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{12,lijf}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{64}{1,62 * 1,21} = 32,65 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$\tau_{lijf,max} = \frac{V_{max}}{A_{lijf}} * \frac{3}{2} = \frac{51,92 * 10^3}{350 * 7,56} * \frac{3}{2} = 29,43 \text{ MPa}$$

Unity check

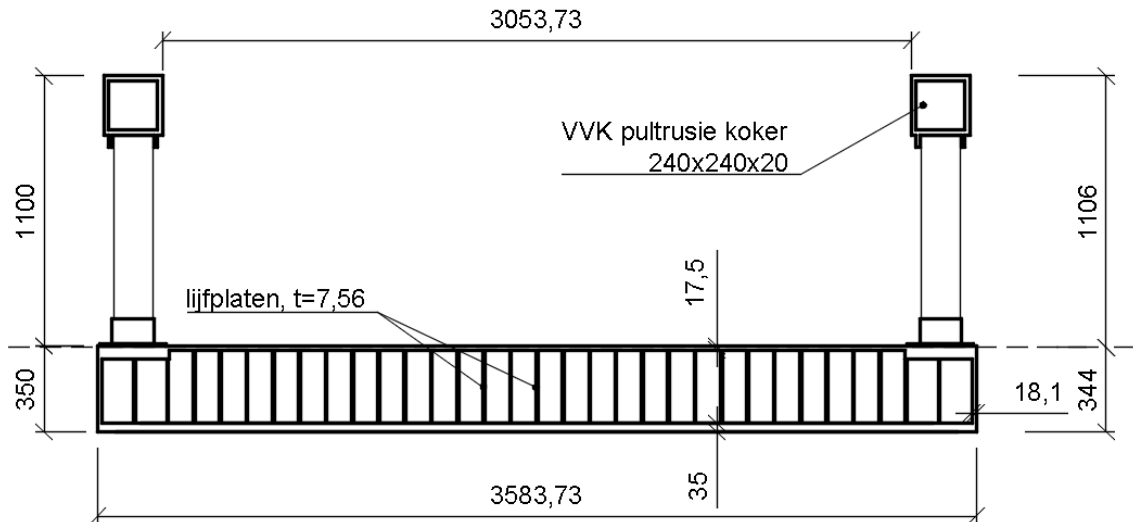
$$\frac{\tau_{lijf,max}}{\tau_{Rd}} = \frac{30,84}{32,65} = 0,90 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Met een te hoge dwarskracht in de lijfplaten kan op meerdere manieren om worden gegaan:

- Er kunnen meer lijfplaten toegepast worden, waardoor de dwarskracht zich verdeeld over meerdere lijfplaten.
- Meer 45/45-lamellen toepassen in de lijfplaten
- Brugdek verhogen en hiermee de oppervlakte van de lijfplaten vergroten.

Trogconstructie

Met een trogconstructie wordt bedoeld dat de leuning constructief meewerkt, terwijl de leuning bij een sandwichconstructie er simpelweg op wordt gemonteerd. Het grote voordeel hiervan is dat het traagheidsmoment aanzienlijk wordt verhoogd. Dit is ten gunste van de eigenfrequentie van het brugdek. De profielen worden vastgemaakt met lijmverbindingen.



Figuur 24: trogconstructie

Comfort

Door het hoge traagheidsmoment van deze constructie is het mogelijk om te ontwerpen op een minimale eigenfrequentie van 2,3 Hz. Hierdoor worden de comforteisen gemakkelijk gehaald.

De fundamentele eigenfrequentie wordt met deze variant aangenomen op 4,102 Hz. De aannames die zijn gemaakt in de sandwichconstructie gelden ook voor deze variant. Dit geeft de waardes zoals aangegeven in tabel 8

Tabel 8

	a_{limit} [m/s ²]	d [personen]	m^* [t]	σ_F	k_1	k_2	σ_a	a_{max} [m/s ²]
Situatie 1	2,5	321	42,29	2,25	1,20	-1,16	0,73	0,68 < 2,5
Situatie 2	1,0	64,2	42,29	0,77	1,36	-1,11	0,37	0,36 < 1,0
Situatie 3	0,5	15	42,29	0,18	1,35	-1,11	0,18	0,17 < 0,5

Sterkte

De laminaatopbouw van deze variant is gelijk aan de laminaatopbouw van de sandwichconstructie. Ook de maatgevende belastingcombinatie is hetzelfde, wat een maximale dwarskracht van 54,36 kN geeft.

Optredende spanning

$$\tau_{\text{lijf,max}} = \frac{V_{\text{max}}}{A_{\text{lijf}}} * \frac{3}{2} = \frac{54,36 * 10^3}{350 * 7,56} * \frac{3}{2} = 30,82 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\tau_{\text{lijf,max}}}{\tau_{\text{Rd}}} = \frac{30,82}{32,65} = 0,94 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Vergelijk

De kosten van de productie een VVK sandwichdek liggen op ongeveer €1000/m². Wanneer de leuning in het dek geïntegreerd wil worden zal dit ongeveer €2500/m² gaan kosten. Deze prijs is gebaseerd op een VVK brug met geïntegreerde leuning van FiberCore met een lengte van 27 meter en 1,5 meter breed. Momenteel kan FiberCore niet breder dan 1,5 meter een brug met geïntegreerde leuning maken. Dit maakt het goedkoper om het sandwichpaneel apart te maken en de leuning er zodanig op te monteren zodat die wel constructief meewerkt. De leuning zal dan bestaan uit pultrusie profielen welke door het bedrijf 'Bijlprofielen' op maat gemaakt kunnen worden. De prijs voor pultrusie profielen ligt dicht in de buurt van staal.

	Onderdeel	Oppervlakte	Soort. Gew.	prijs/kg	productiekosten	totale kosten
Sandwich-constructie	VVK dek	0,271	1912	5	€ 320.000	€ 600.000
	Stalen leuning	0,028	7850	4	€ 35.000	€ 80.000
	Trillingdempers	-	-	-	-	€ 80.000
						€ 760.000
VVK dek met geïntegreerde leuning	VVK dek	0,185	1912	5	€ 320.000	€ 500.000
	VVK leuning	0,053	1912	5	€ 50.000	€ 80.000
						€ 610.000
Origineel	Staal	0,049	7850	4	€ 165.000	€ 330.000

Een VVK leuning integreren met een VVK dek geeft een hoog traagheidsmoment en heeft weinig onderhoud nodig. Het grote nadeel is dat de productiekosten en mogelijkheid tot productie het tegenhoud. Een VVK leuning achteraf op het brugdek monteren is momenteel de meest haalbare optie. Er kan dan gekozen worden voor twee mogelijkheden: de leuning wel of niet constructief laten meewerken. De leuning wel constructief laten meewerken blijkt de beste optie. Door de lage stijfheid van de andere variant moeten er extra maatregelen worden getroffen om de gevolgen van de lage stijfheid op te vangen.

7. Conclusies en aanbevelingen

Door een schuin staande pyloon toe te passen komt er een extra moment op de pyloon te staan en de top van de pyloon buigt meer uit. Vooral dat laatste kan voor problemen zorgen in het brugdek. De uitbuiging van de top zorgt voor een lichte extra ontlasting voor de tuien. Dit betekent dus dat er minder spanning op de tuien komt te staan, wat de fictieve E-modulus van de tuien nadelig beïnvloedt. Een lagere E-modulus geeft een lagere k-factor die gekoppeld zijn aan de tuien. Dit zorgt vervolgens weer voor lagere eigenfrequenties in het brugdek en maakt het meer vatbaar voor resonantie en vandalisme.

Aan te raden is om het VVK brugdek te ontwerpen op een minimale eigenfrequentie van 2,3 Hz. Deze waarde valt net buiten het gebied waar het brugdek gevoelig is voor resonantie. Hierdoor zullen de trillingen in het brugdek door merendeel van de mensen als comfortabel worden ervaren. Daarnaast hoeven er weinig maatregelen genomen te worden tegen vandalen. De waarde van 2,3 Hz is te halen als de leuning constructief meewerkt met het brugdek.

Veiligere ontwerp mogelijkheden van het voorgaande zijn:

- Het kiezen van een centrisch staande pyloon, zoals de pyloon van de tuibrug van de ParkShuttle (figuur 18). Hiermee wordt de uitbuiging van de top in de breedte richting geminimaliseerd.
- Meer tuien toepassen. Door de minimale benodigde spanning in de tuien zullen de tuien dan ook dunner worden. Dit maakt het gevoeliger voor trillingen, dus trillingsdempers in de tuien is aan te raden.
- Een betonnen brugdek toepassen. Dit valt buiten het kader van dit onderzoek, maar een betonnen brugdek kent een aantal voordelen. Het stalen brugdek van de ringvaartplasbrug is net aan zwaar genoeg voor de minimale benodigde spanning in de tuien. Een VVK brugdek kan dus niet worden toegepast om gewicht te besparen. Het voordeel van VVK moet gehaald worden uit het besparen van onderhoudskosten. Met een betonnen brugdek zal de minimale spanning in de tuien minder een probleem zijn en beton heeft ook weinig onderhoud nodig. Door de voorgaande twee punten toe te passen kunnen de trillingen in het brugdek prima behandeld worden.

De materiaal- en productiekosten van de pyloon en het brugdek in VVK worden iets duurder dan wanneer deze in staal worden gemaakt. Dit is te compenseren met besparende onderhoudskosten.

Vervolgonderzoek

Door de afbakening van dit onderzoek zijn er een aantal dingen die niet onderzocht konden worden. Dit gaat om de volgende punten:

- De kosten zijn in dit onderzoek heel globaal bepaald met onderhoudskosten buiten beschouwing gelaten. De werkelijke kosten moet nog bepaald worden.
- Er is in 1994 een onderzoek gedaan naar de ringvaartplasbrug met een dek van hogesterktebeton. Door dat onderzoek te updaten naar de huidige normen en vervolgens te vergelijken met dit onderzoek, kan er worden bekeken wat eventueel beter is. Hierbij spelen onderhoud en trillingen van het brugdek een grote rol.
- Onderzoek naar andere brugtypes, bijvoorbeeld boogbruggen of hangbruggen. Mogelijk dat het beter is om in een ander type brug VVK toe te passen.
- De resonantie van de tuidraden en resonantie tussen brugdek, tuien en pyloon.

Ringvaartplasbrug in VVK

Uit het onderzoek is gebleken dat VVK goed toepasbaar is in de ringvaartplasbrug, maar dit kent zijn nadelen:

- De materiaal- en productiekosten van VVK zullen hoger liggen dan staal. Dit kan eventueel gecompenseerd worden met besparende onderhoudskosten.
- Momenteel zijn er nog beperkingen in de produceerbaarheid van een brug als deze. Hier zijn wel oplossingen voor, maar op korte termijn zal dit leiden tot extra kosten.
- Het is gevoelig voor resonantie. Het brugdek op zichzelf voldoet aan comforteisen, maar er is in dit onderzoek niet gekeken naar de resonantie tussen brugdek, tuien en pyloon.

Er is een nieuw ontwerp gemaakt van de ringvaartplasbrug waarin VVK is toegepast in het brugdek, de mast van de pyloon en de schoren van de pyloon. Dit ontwerp is getoetst aan de huidige normen, wat te vinden is in bijlage V. In bijlage VI is de tekening te vinden van het VVK ontwerp van de ringvaartplasbrug.

Net als in het onderzoek zullen de mast en de schoren van de pyloon van VVK zijn. Ten behoeve van de stabiliteit van de top van de pyloon zal de trekstang en achtertui van staal blijven.

Het brugdek bestaat uit een sandwichconstructie met daarop een gemonteerde leuning. De leuning werkt constructief mee aan de stijfheid en er wordt ontworpen op een minimale eigenfrequentie van 2,3 Hz. Dit wordt als een veilig ontwerp gezien en bovendien goed te doen in kosten. De laterale trillingen in het brugdek worden nu ook getoetst aan het comfort van de gebruiker. Hierbij is gebleken dat wanneer de brug helemaal vol staat met mensen, dat de comforteisen niet voldoen. Deze overschrijding wordt acceptabel geacht om een aantal redenen. Volgens onderzoek zijn de gestelde eisen in EUR 23984 EN te scherp en kunnen soepeler genomen worden. Daarnaast zullen de gebruikers die trillingen als oncomfortabel ervaren de brug verlaten. Hiermee worden de trillingen ook minder.

Het vakwerk wordt getoetst op knik, waarin er naar twee situaties wordt gekeken: het lokaal knikken van de staven en het knikken van het vakwerk als geheel. De laatst genoemde blijkt maatgevend, maar voldoet met een unity check van 0,44.

Bibliografie

- Beers, F. (2014). *Trillingen van betonnen voetgangersbruggen*. Delft: TU Delft.
- Bosman, P. (2015). *Biocomposiet brugdek*. Zwolle: Windesheim.
- Braakman, L. (2016). *Composiet als constructiemateriaal*. Enschede: Saxion University of Applied Science.
- Brakel, J. (1981). *Tuibruggen in voorgespannen beton, deel 1 en 2*. Delft: Technische Hogeschool Delft.
- Chlosta, M. (2012). *FEASIBILITY STUDY ON FIBER REINFORCED POLYMER CYLINDRICAL TRUSS BRIDGES FOR HEAVY TRAFFIC*. Delft: TU Delft.
- CUR commissie C 124. (2003). *Aanbeveling 96 vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies*. Gouda: CUR.
- CUR commissie C 124. (2017). *Aanbeveling 96 vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies (1e herziene uitgave)*. Gouda: CUR.
- Derix. (2017, februari 27). *Bouwstof hout - materiaaleigenschappen*. Opgehaald van Derix: http://www.derix.de/nl/baustoff_holz/materialkennwerte
- Grit, R. (2012). *Zo doe je een ... Onderzoek (tweede druk)*. Groningen / Houten: Noordhoff Uitgevers.
- Gurit. (2017, maart 23). *Composite Materials*. Opgehaald van Gurit: <http://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials>
- Hohan, R. (2012). *EFFECT OF CONTIGUITY ON SHEAR ELASTIC MODULUS OF FIBRE REINFORCED POLYMERIC COMPOSITES*. Iași: "Gheorghe Asachi" Technical University of Iași.
- Hohan, R. (2017, februari 14). *Effect of Contiguity on Shear Elastic Modulus of Fibre Reinforced Polymeric Composites*. Opgehaald van The Bulletin of the Polytechnic Institute: <http://www.bipcons.ce.tuiasi.ro/Content/ArticleInformation.php?ArticleID=307>
- IJselmuiden, v. K. (2014). *SOGNEFJORD HAALBAARHEIDSSSTUDIE VOOR EEN HANGBRUG IN VVK MET EEN OVERSPANNING VAN 3,7 KM*. Amersfoort: Royal HaskoningDHV.
- Kirkhaar, H. (2011). *Betonpocket 2012 (6e herziene druk)*. 's-Hertogenbosch: ENCI.
- Knuistingh Neven, D. &. (2014). *Spoorbrug in vezelversterkt kunststof, composiet*. Rotterdam: Hogeschool Rotterdam.
- Nederlandse Bruggen Stichting. (2004). *Bruggen - visie op architectuur & constructie*. Zoetermeer: Matrijs.
- Nijhof, A. (2004). *Vezelversterkte kunststoffen Mechanica en ontwerp (eerste druk)*. Delft.
- Nijssen, R. (2015). *Composieten Basiskennis (3e gewijzigde druk)*. Hoofddorp: Hogeschool Inholland.
- Paauwe, J. (2017, februari 7). *VVK in moreelsebrug*. (L. Kraaijenbrink, Interviewer)
- Productiemethoden*. (2017, februari 16). Opgehaald van Bouwmeester Advanced Composites B.V.: <http://sp-bac.nl/?id=85>
- Sayed, M. &. (2009). *Onderzoek naar composietmaterialen in brugconstructies*. Rotterdam: Hogeschool Rotterdam.
- Sousamli, M. (2017). *Metadata of the chapter that will be visualized in SpringerLink*. Rotterdam: Gemeente Rotterdam.
- sterkte UHSB theoretisch benaderd volgens EC*. (2017, februari 27). Opgehaald van Ultra Hoge Sterkte Beton: <http://www.uhsb.nl/?p=344>

UHSB en kruip. (2017, februari 27). Opgehaald van Ultra Hoge Sterkte Beton: <http://www.uhsb.nl/?p=406>

Vereniging Kunststof Composieten Nederland. (2017). Opgehaald van Vereniging Kunststof Composieten Nederland: <http://www.vkcn.nl/>

Bijlagen

Overzicht bijlagen:

- I. Verschillen van VVK met andere materialen
- II. Beschouwing ringvaartplasbrug
- III. Berekening pyloon
- IV. Berekening brugdekken
- V. Aanbeveling berekeningsrapport
- VI. Aanbeveling tekening

Hogeschool Rotterdam / Gemeente Rotterdam

VVK in tuibruggen

Bijlage I - Verschillen van VVK met andere materialen

Naam:	Lennart Kraaijenbrink
Studentnummer:	0884858
Versie:	1.0 (definitief)
Datum:	dinsdag 13 juni 2017

Inhoudsopgave

Inleiding.....	2
1. Vergelijkbare materialen met VVK.....	3
VVK.....	3
Materiaaleigenschappen.....	4
Staal.....	5
Materiaaleigenschappen.....	5
Staalbeton.....	5
Gewapend beton.....	6
Materiaaleigenschappen.....	6
Lichtbeton en UHSB.....	7
Materiaaleigenschappen.....	7
Hout.....	8
Materiaaleigenschappen.....	8
Aluminium legering.....	9
Materiaaleigenschappen.....	9
2. Verschillen in materialen.....	10
3. Conclusie.....	12
Bibliografie.....	13
Bijlagen.....	14
Bijlage A – Bepaling eigenschappen VVK.....	15
Uitgangspunten.....	15
Toegepaste normen & literatuur.....	15
Gegevens VVK.....	15
Aangenomen richtingen.....	15
Aangenomen eigenschappen vezels en hars.....	15
Bepaling parameters.....	16
Dichtheid.....	16
Stijfheid.....	16
Poisson ratio.....	19
Sterkte.....	20
Lineaire thermische uitzetting.....	22

Inleiding

Er bestaan al talloze bruggen in hout, beton en staal. Tegenwoordig hebben bruggen van vezelversterkt kunststof (VVK) bewezen dat ze goed toe te passen zijn op korte overspanningen. Deze overspanningen gaan tot ongeveer 30 meter. Om het als serieuze concurrentie te zien van de conventionele materialen zal VVK zich ook moeten bewijzen op grotere overspanningen.

In dit onderzoek wordt er een VVK brug met een overspanning van 100 meter beschouwd. Wanneer er glasvezels worden toegepast in het composiet is een vrije overspanning van 30 meter al moeilijk te halen met een VVK brug, laat staan 100 meter. Er wordt daarom onderzocht hoe een VVK brug eruit moet komen te zien in de vorm van een tuibrug. Als referentiebrug wordt de ringvaartplasbrug gebruikt.

In deze bijlage wordt het antwoordt op deelvraag 2 onderbouwd. Door VVK te vergelijken met staal, staalbeton, gewapend beton, lichtbeton, Ultra Hoge Sterkte Beton, hout en aluminium legeringen kunnen er conclusies worden getrokken waar VVK goed voor te gebruiken is.

1. Vergelijkbare materialen met VVK

VVK heeft, zoals eerder in dit hoofdstuk behandeld, veel verschillende eigenschappen. Om de voordelen van VVK bij het ontwerp van een fietsbrug te vinden, moet er eerst een vergelijking worden gemaakt met bestaande constructiematerialen. De eigenschappen van constructiematerialen die worden vergeleken met de eigenschappen van VVK zijn:

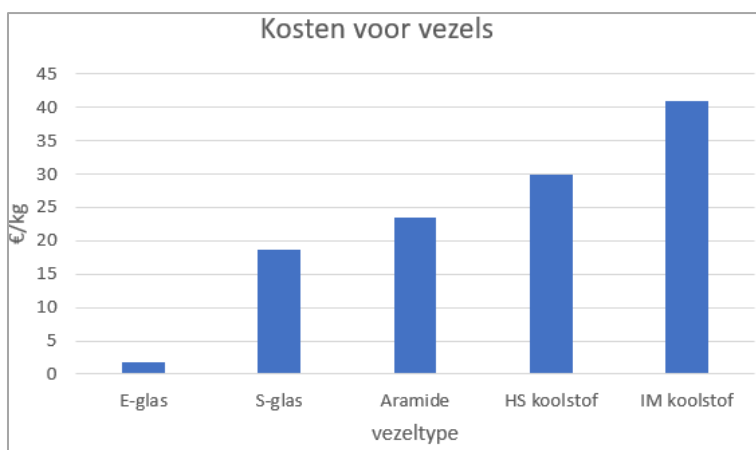
- Staal
- Staalbeton
- Gewapend beton
- Lichtbeton
- Ultra Hoge Sterkte Beton (UHSB)
- Hout
- Aluminium legeringen

Van elk van deze materialen zal een vergelijking worden gemaakt in over de eerder behandelde faalmechanismes die op kunnen treden bij VVK, de kosten en materiaaleigenschappen.

VVK

VVK is in de civiele wereld een relatief nieuw constructiemateriaal. Het is vooralsnog geen goedkoop materiaal als je het vergelijkt met staal, beton en hout. De kosten van een VVK constructie hangt niet alleen af van de prijs van de vezels en harsen, maar ook van de productie. Er zijn bijvoorbeeld kostbare mallen nodig. Als deze mallen vaker gebruikt kunnen worden scheelt het al in de totale kosten. Echter zal een fietsbrug met een overspanning van 100 meter niet zo vaak neergelegd worden, waar dus rekening mee gehouden moet worden bij de keuze van het composiet.

Er kunnen verschillende vezels in het composiet worden gebruikt. De meest gebruikte vezel in de bouw zijn E-glasvezels. De 'E' staat voor elektrisch. Glasvezels zijn tot op zekere hoogte op gewenste eigenschappen te produceren. C-glas is bijvoorbeeld goed bestand tegen chemische stoffen, waardoor het goed toe te passen is in rioolbuizen. S-glas is dan weer vergelijkbaar met E-glas met verbeterde sterkte- en stijfheidseigenschappen.



Figuur BI.1

Uit figuur BI.1 blijkt dat als er gekozen wil worden voor vezels met een hoge stijfheid, dat de kosten al snel een factor 10 groter worden. Bij een fietsbrug met een overspanning van 100 meter zal het in de meeste gevallen niet rendabel zijn om voor vezels te kiezen met betere eigenschappen. Er wordt dus veronderstelt dat er genoodzaakt E-glasvezels gekozen moeten worden.

Voordelen van VVK:

- Hoge sterkte
 - Slanke constructies mogelijk
- Ontwerpvrijheid (in opbouw composiet en vormgeving constructie)
- Goed bestand tegen vermoeiing
- Laag eigen gewicht
- Weinig onderhoud nodig / lange levensduur
- Kruip afhankelijk van de opbouw van het composiet, maar over het algemeen goed bestand tegen kruip

Nadelen van VVK:

- Relatief lage stijfheid
 - Gevoelig voor knik
 - Gevoelig voor trillingen en doorbuigingen
- Gevoelig voor splijten en delaminatie
- Relatief duur, in bruggen is de keuze voor glasvezels bijna geforceerd omdat koolstof te duur is.
- VVK vervormt niet plastisch / geen waarschuwing wanneer VVK faalt

Materiaaleigenschappen

Een fietsbrug met een overspanning van 100 meter vraagt veel van het materiaal, met name op het gebied van stijfheid. Voor VVK betekent dat, dat het veel vezels moet bevatten. Ook kunnen alle vezels niet in één richting liggen, maar ten behoeve van de stijfheid wordt ervoor gekozen om een groot deel van de vezels in de overspanningsrichting te leggen.

In tabel BI.1 worden de eigenschappen gegeven van een composiet van E-glasvezels en polyesterhars, zoals berekend in bijlage A. 80% van de vezels worden in de overspanningsrichting gelegd en 20% dwars daarop. Het vezelvolumepercentage ligt op 60%. Dit composiet kan worden weergegeven als:

E-glas/polyester, 0° (80°)/90° (20%), $v_f = 0,6$

Tabel BI.1

		E-glas/polyester, 0° (80°)/90° (20%), $v_f = 0,6$
Dichtheid [kg/m³]		2022
Vezelrichting	Poisson ratio ν_{12}	0,23
	Stijfheid $E_{c,0}$ [MPa]	38072,28
	Treksterkte $\sigma_{t,1}$ [MPa]	699,26
	Druksterkte $\sigma_{c,1}$ [MPa]	454,31
Loodrecht op vezelrichting	Poisson ratio ν_{21}	0,11
	Stijfheid $E_{c,90}$ [MPa]	17709,13
	Treksterkte $\sigma_{t,2}$ [MPa]	208,23
	Druksterkte $\sigma_{c,2}$ [MPa]	263,97
Afschuiving	Modulus G_{12} [MPa]	5779,10
	Sterkte τ_{12}	109,80
Thermische uitzetting	α_1 [$10^{-6}/K$]	6,0
	α_2 [$10^{-6}/K$]	29,5

Staal

Staal komt qua eigenschappen het dichtst in de buurt van VVK als het gaat om constructiematerialen. In dit rapport zal er voornamelijk ook deze vergelijking worden gemaakt. De meest gebruikte staalsoorten zijn S235, S275 en S355. De prijs van staal ligt ongeveer op een euro per kg. Dit is vergelijkbaar met VVK als er gekozen wordt voor E-glasvezels.

Voordelen van staal:

- Hoge sterkte
 - Slanke constructies mogelijk
- Hoge stijfheid
 - Goed bestendig tegen kruip
 - Goed bestendig tegen knik
 - Kleine doorbuigingen
- Ontwerpvrijheid (in vormgeving)
- Goedkoop
- Staal vervormt plastisch / waarschuwing wanneer staal faalt

Nadelen van staal:

- Hoog eigen gewicht
- Gevoelig voor vermoeiing
- Gevoelig voor erosie
- Veel onderhoud nodig

Materiaaleigenschappen

Een veelgebruikte staalkwaliteit in bruggen is S355. De eigenschappen voor staal S355 zijn:

Tabel BI.2

		Staal S355
Dichtheid [kg/m³]		7850
Elke richting	Stijfheid E [MPa]	210000
	Vloeigrens f_y [MPa]	355
	Treksterkte f_u [MPa]	490
Afschuiving	Poisson ratio ν	0,3
	Modulus G_{12} [MPa]	80769,23
	Afschuifsterkte τ [MPa]	205
Thermische uitzetting	α [$10^{-6}/K$]	12,0E-06

Staalbeton

Bij een constructie van staalbeton werkt het staal en beton samen om elkaar te versterken. Hierdoor wordt onder andere de stijfheid verbeterd, wat erg van belang is bij bruggen. De eigenschappen van staalbeton zijn echter niet in een tabel weer te geven, omdat de eigenschappen afhangen van het ontwerp. Wel is er het volgende te zeggen over staalbeton constructies (ten opzichte van prefab beton- of staalconstructies):

- Kostenbesparend
- Stijfheid wordt verhoogd
- Sterker dan prefab beton

Gewapend beton

Als men over composieten spreekt, wordt er vaak VVK bedoeld. Gewapend beton is nog veel ouder composiet. Door de samenwerking van het beton en betonstaal kan het veel opnemen dan beton apart. Gewapend beton is erg goedkoop en wordt daarom vaak gekozen boven sterkere en stijvere materialen.

Voordelen van gewapend beton:

- Zeer goedkoop
- Ontwerpvrijheid (in vormgeving)
- Weinig onderhoud nodig
- Goed brandwerend, zolang de dekking dik genoeg is
- Kan goed druk opnemen
- De wapening zorgt voor een hoge treksterkte
- Beton scheurt / waarschuwing wanneer beton faalt

Nadelen van gewapend beton:

- Gevoelig voor afschuiven
- Lage elasticiteitsmodulus die alleen maar zal afnemen in de loop der tijd
 - Gevoelig voor knik
 - Gevoelig voor doorbuigingen
- Laag eigen gewicht, maar in een constructie is veel beton nodig waardoor de constructie zwaar wordt
- Gevoelig voor kruip en krimp

Materiaaleigenschappen

Een veelgebruikte betonkwaliteit in bruggen is C35/45 met betonstaal FeB 500. De eigenschappen voor beton C35/45 zijn:

Tabel BI.3

		Beton C35/45 (FeB 500)
Dichtheid [kg/m³]		2500
Elke richting	Stijfheid korte duur E [MPa]	34100
	Kruipfactor ϕ	2,1
	Fictieve stijfheid E_f [MPa]	12723,88
	Druksterkte f_{ck} [MPa]	35
	Treksterkte betonstaal f_{yk} [MPa]	500
Afschuiving	Poisson ratio ν	0,2
	Modulus G_{12} [MPa]	5301,62
Thermische uitzetting	α [10 ⁻⁶ /K]	10,0E-06

Lichtbeton en UHSB

Een van de belangrijkste eigenschappen van VVK is dat het een licht materiaal is. In de vorige paragraaf is gebleken dat een betonnen constructie zwaarder is dan een VVK constructie. Met lichtbeton kan er gewicht worden bespaard, waardoor het qua gewicht beter concurreert met VVK.

Bijkomende voordelen van lichtbeton t.o.v. normaal beton:

- Lichter

Bijkomende nadelen van lichtbeton t.o.v. normaal beton:

- Kubusdruksterkte neemt af
- E-modulus neemt af: E-modulus van lichtbeton is 70-75% van normaal beton met een vergelijkbare sterkteklasse
- Kruip en krimp wordt sterk nadelig beïnvloed

Voor een fietsbrug met een overspanning van +- 75 meter zal het gebruik van lichtbeton zeer waarschijnlijk in het nadeel werken. Dan kan er nog worden gekeken naar de sterkte en stijfheid van beton ten opzichte van VVK. De stijfheden zijn vergelijkbaar met elkaar, maar qua sterkte heeft VVK een grote voorsprong. Met UHSB wordt de sterkte en stijfheid van de constructie verhoogd.

Bijkomende voordelen van UHSB t.o.v. normaal beton:

- Effecten van kruip nemen af
- Sterkte en stijfheid nemen toe
 - Slanker bouwen / lichtere constructie

Bijkomende nadelen van UHSB t.o.v. normaal beton:

- Duurder, hoewel er wel kosten zijn te besparen op de hoeveelheid materiaal en transportkosten
- Slecht voor milieu / niet duurzaam

Materiaaleigenschappen

Tabel BI.4

		Beton LC35/38 (FeB 500)	UHSB C170/200
Dichtheid [kg/m³]		800-2000	2500
Elke richting	Stijfheid korte duur E [MPa]	24500	52185
	Kruipfactor ϕ	2,1	0,8
	Fictieve stijfheid E_f [MPa]	9141,79	31820,12
	Druksterkte f_{ck} [MPa]	35	170
	Treksterkte betonstaal f_{yk} [MPa]	500	500
Afschuiving	Poisson ratio ν	0,2	0,2
	Modulus G_{12} [MPa]	3809,08	13258,38
Thermische uitzetting	α [10 ⁻⁶ /K]	10,0E-06	10,0E-06

Hout

Hout is net als VVK een anisotroop materiaal. Ook kan een houten constructie opgebouwd worden uit lamellen. Hierdoor is de verdeling van eigenschappen in verschillende richtingen zelf te bepalen bij het ontwerp.

Voordelen van hout:

- Goedkoop
- Laag eigen gewicht

Nadelen van hout:

- beperkte ontwerpvrijheid (in vormgeving)
- Anisotroop
- Veel onderhoud nodig / lage levensduur
- Kan gaan rotten
- Lage sterkte
- Gevoelig voor kruip
- Relatief lage stijfheid
 - Gevoelig voor knik
 - Gevoelig voor doorbuigingen
- Gevoelig voor splijten en delaminatie
- Presteert zeer slecht bij brand

Materiaaleigenschappen

Hout is van de eerder benoemde constructiematerialen de zwakste uit het rijtje. Om het nog te laten concurreren met VVK, staal en beton wordt er een hoge houtkwaliteit gekozen.

Tabel BI.5

		Hout GL36h
Dichtheid [kg/m³]		410
Buigsterkte $f_{m,k}$		36
Vezelrichting	Stijfheid $E_{0,mean}$ [MPa]	14700
	Treksterkte $\sigma_{t,1}$ [MPa]	26
	Druksterkte $\sigma_{c,1}$ [MPa]	31
Loodrecht op vezelrichting	Stijfheid $E_{90,mean}$ [MPa]	490
	Treksterkte $\sigma_{t,2}$ [MPa]	26
	Druksterkte $\sigma_{c,2}$ [MPa]	3,6
Afschuiving	Modulus G_{12} [MPa]	910
	Schuifsterkte $f_{v,k}$	2,5
Thermische uitzetting	α_1 [$10^{-6}/K$]	3,5E-06
	α_2 [$10^{-6}/K$]	40,0E-06

Aluminium legering

Aluminium wordt niet heel veel gebruikt als dragende delen in een constructie. Qua eigenschappen is het heel vergelijkbaar met VVK.

Voordelen van VVK:

- Redelijk hoge sterkte / vergelijkbaar met een lage staalkwaliteit
- Ontwerpvrijheid (in vormgeving constructie)
- Laag eigen gewicht
- Weinig onderhoud nodig
- Goed te recyclen / duurzaam materiaal

Nadelen van VVK:

- Heel gevoelig voor vermoeiing
- Relatief lage stijfheid
 - Gevoelig voor knik
 - Gevoelig voor trillingen en doorbuigingen
- Aluminium legeringen vervormen plastisch / waarschuwing wanneer VVK faalt
- Ongeveer 2 keer zo duur als staal

Materiaaleigenschappen

In de bouw wordt vaak aluminium legeringen met een code 6xxx gebruikt. Dit is een sterk materiaal, waar alleen de serie 7xxx boven uit komt. Net als met glasvezels en koolstofvezels, zijn de legeringen met de code 7xxx te duur om het in bruggen te gebruiken.

Tabel BI.6

		EN AW-6082 (AlMgSi1)
Dichtheid [kg/m³]		2700
Elke richting	Stijfheid E [MPa]	70000
	Trekterkte σ_t [MPa]	290
Afschuiving	Poisson ratio ν	0,32
	Modulus G_{12} [MPa]	26515,15
Thermische uitzetting	α [$10^{-6}/K$]	24,0E-06

2. Verschillen in materialen

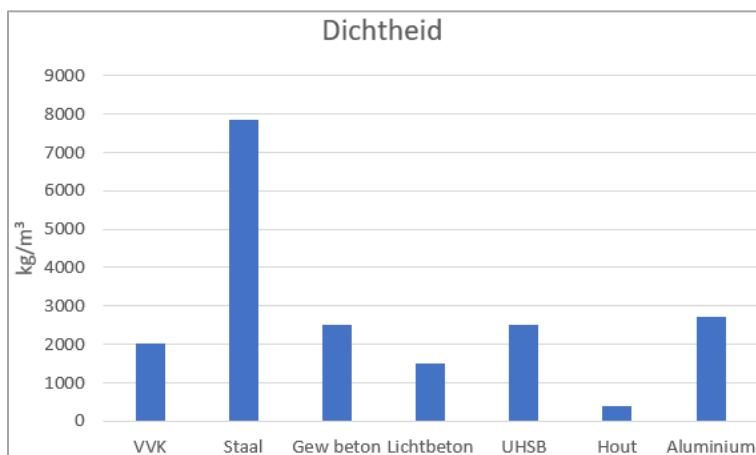
Bij het ontwerp van een fietsbrug van 100 meter zijn de volgende constructieve materiaaleigenschappen van belang:

- De dichtheid van het materiaal: Met een overspanning van 100 meter kan een brug flink wat gaan wegen. Als er gekozen kan worden voor een licht materiaal scheelt dit enorm in het totale gewicht van de constructie. Het totale gewicht van de constructie gaat samen met de eigenschappen van het gekozen materiaal. Als er namelijk een heel licht materiaal wordt gekozen, maar de eigenschappen zijn slecht, dan wordt de constructie dik wat het ook zwaarder maakt.
- De sterkte van het materiaal: hoe sterker het materiaal, hoe slanker het materiaal als de sterkte berekening maatgevend is.
- De stijfheid van het materiaal: Als doorbuigingen maatgevend zijn is het van belang dat er een stijf materiaal wordt gekozen
- De lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt: In de formule voor de uitzetting van een constructie zit de parameter lengte L in verwerkt. Hoe langer de constructie, hoe groter de uitzetting. Het is daarom niet onbelangrijk om voor een materiaal te kiezen met een lage lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt.

Naast de constructieve materiaaleigenschappen zijn ook de volgende ontwerpaspecten van belang:

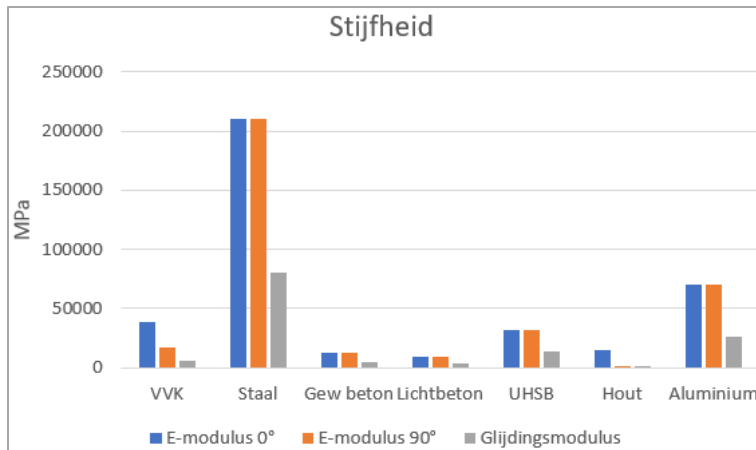
- Kosten: Ondanks de keuze op basis van constructieve materiaaleigenschappen moet de constructie ook betaalbaar blijven.
- Duurzaamheid: Dit aspect wordt steeds belangrijker. Dit is daarom ook onderdeel van de EMVI criteria bij een inschrijving van een project. Een duurzamer ontwerp kan het soms winnen van een goedkoper ontwerp.
- Randvoorwaarden van het project: Als bijvoorbeeld de eis is dat er slank gebouwd moet worden, vallen sommige materialen al af, ondanks dat ze eventueel goedkoper en/of duurzamer zijn.

De materiaalkeuze van een fietsbrug van 100 meter is in de meeste gevallen afhankelijk van het best scorende materiaal op dichtheid en stijfheid.



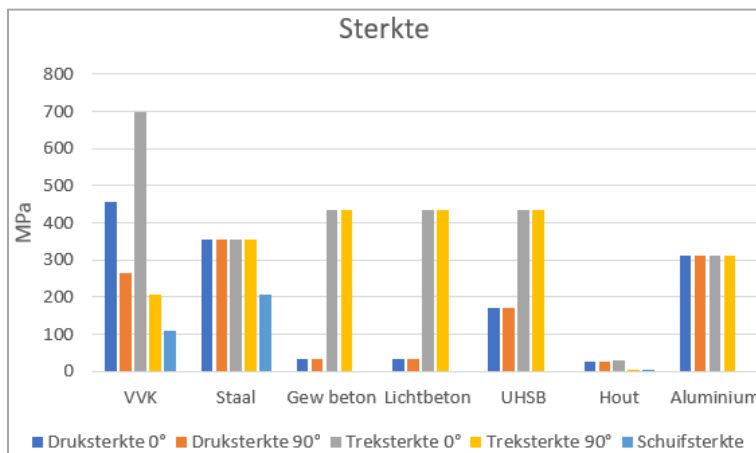
Figuur BI.2

De dichtheid van het materiaal zegt niet alles over het uiteindelijke gewicht van een brug. Van beton is er veel meer materiaal nodig dan staal, waardoor een betonnen brug vaak zwaarder uitvalt dan een stalen brug. Samen met andere constructieve materiaaleigenschappen kan er iets worden gezegd over het gewicht van een brug.



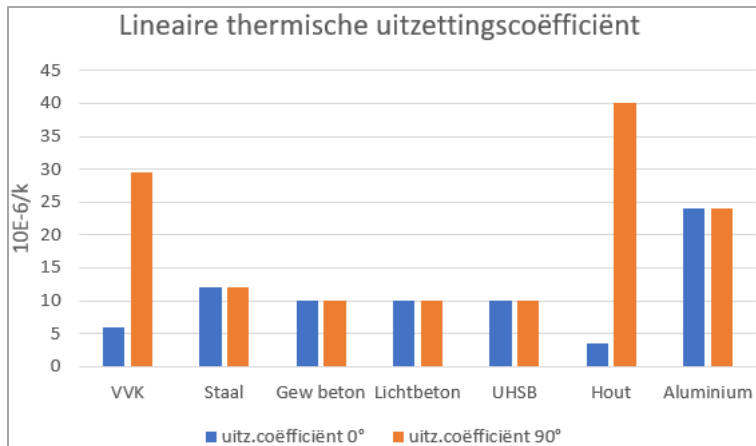
Figuur BI.3

Stijfheid is een zeer belangrijk aspect als het gaat om een brug van 100 meter. In figuur BI.3 is te zien dat staal verreweg en stijfste materiaal is. Liggerbruggen met grote overspanningen worden dan ook vrijwel altijd van staal gemaakt.



Figuur BI.4

In figuur BI.4 is te zien dat VVK in de overspanningsrichting de beste sterkte eigenschappen heeft. Staal kan goed concurreren met VVK op het gebied van sterkte, zeker als er een hogere staalkwaliteit wordt gekozen. Maar er moet niet vergeten worden dat staal bijna 4 keer zoveel weegt. Hierop wint VVK het dus van staal. Wat ook goed concurreert met VVK is UHSB. In druksterkte heeft UHSB iets minder capaciteit, maar bij een UHSB fietsbrug van 75 meter zal de stijfheid maatgevend zijn. Als de stijfheid voldoet, dan voldoet de sterkte ook. Ook qua dichtheid zit VVK dicht in de buurt van UHSB. Maar er is te concluderen dat VVK qua sterkte beter scoort dan UHSB. Hetzelfde geldt voor aluminium legeringen, VVK scoort net wat beter op het gebied van sterkte



Figuur BI.5

De lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt is van belang bij bruggen met een grote overspanning, omdat het materiaal een groot stuk kan uitzetten als de brug langer wordt. In de formule voor de uitzetting van een constructie zit namelijk de parameter lengte L in verwerkt. Het is daarom niet onbelangrijk om voor een materiaal te kiezen met een lage lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt.

3. Conclusie

Kiezen voor VVK is niet direct de goedkoopste oplossing, maar er zijn wel kosten te besparen op bijvoorbeeld installatiekosten en onderhoudskosten. Als er voor VVK als constructiemateriaal gekozen wil worden voor een fietsbrug met een overspanning van 100 meter, dan moet er rekening worden gehouden met de volgende materiaaleigenschappen:

- Dichtheid
- Stijfheid
- Sterkte
- Lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt

De verhouding van sterkte en dichtheid is bij VVK erg hoog. Als dit vergeleken wordt met beton steekt VVK er ruim bovenuit. Deze verhouding is zelfs ten opzichte van staal bijna 4 keer zo groot. Er valt dus te concluderen dat met VVK zeer licht geconstrueerd kan worden. Maar aan een lichte constructie heb je niks als de stijfheid te laag is voor een overspanning van 100 meter. Het is dus van belang dat hier slim mee om wordt gegaan bij de brugtypekeuzes van een VVK fietsbrug met een overspanning van 100 meter.

Bibliografie

CUR commissie C 124. (2003). Aanbeveling 96 vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies. Gouda: CUR.

Hohan, R. (2017, februari 14). Effect of Contiguity on Shear Elastic Modulus of Fibre Reinforced Polymeric Composites. Opgehaald van The Bulletin of the Polytechnic Institute:
<http://www.bipcons.ce.tuiasi.ro/Content/ArticleInformation.php?ArticleID=307>

Nijhof, A. (2004). Vezelversterkte kunststoffen Mechanica en ontwerp (eerste druk). Delft.

Nijssen, R. (2015). Composieten Basiskennis (3e gewijzigde druk). Hoofddorp: Hogeschool Inholland.

Pauwe, J. (2017, februari 7). VVK in moreelsebrug. (L. Kraaijenbrink, Interviewer)

Bijlagen

Overzicht bijlagen:

- A. Bepaling eigenschappen VVK

Bijlage A – Bepaling eigenschappen VVK

Uitgangspunten

Toegepaste normen & literatuur

CUR-aanbeveling 96 1^e herziene versie

Vezelversterkte kunststoffen – mechanica en ontwerp

Gegevens VVK

In dit rapport wordt er uitgegaan van composiet van E-glasvezels en polyesterhars. 80% van de vezels worden in de overspanningsrichting gelegd en 20% dwars daarop. Het vezelvolumepercentage ligt op 60%. De beschrijving voor dit composiet is:

E-glas/polyester, 0° (80%)/90° (20%), $v_f = 0,6$:

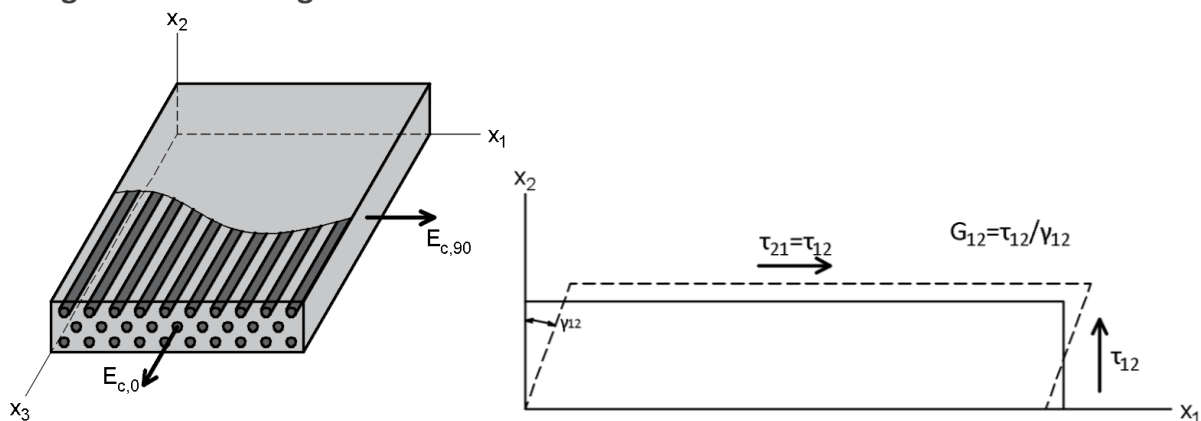
E-glas/polyester: gebruikte materialen (vezel/hars)

0°/90°: vezelrichtingen

80%/20%: verdeling van de vezels over de richtingen

$v_f = 0,6$: vezelvolumegehalte

Aangenomen richtingen



Aangenomen eigenschappen vezels en hars

		E-glas	Polyester
Dichtheid [kg/m ³]	ρ_f	2570	1200
E-modulus [MPa]	E_f	73100	2500
Poissonverhouding [-]	ν_f	0,24	0,38
Rekgrens [%]	$\epsilon_{1,t}$	2,0	n.v.t.
	$\epsilon_{2,t}$	0,2	n.v.t.
	$\epsilon_{1,c}$	1,2	n.v.t.
	$\epsilon_{2,c}$	0,9	n.v.t.
	γ_{12}	1,9	n.v.t.
Lin. Therm. Uitz. coëff [10 ⁻⁶ /K]	α	5	80

Bepaling parameters

Dichtheid

De dichtheid wordt bepaald met behulp van de mengselregel

$$\rho_c = v_f \rho_f + v_m \rho_m$$

Waarin:

ρ_c = dichtheid composiet

v_f = vezelvolumegehalte

ρ_f = dichtheid vezels

v_m = harsvolumegehalte

ρ_f = dichtheid hars

Uitkomst

$$\rho_c = 0,6 * 2570 + (1 - 0,6) * 1200$$

$$\rho_c = 2022 \text{ kg/m}^3$$

Stijfheid

De stijfheid in de vezelrichting wordt bepaald met behulp van de mengselregel. Als eerste stap wordt er aangenomen dat alle vezels in dezelfde richting liggen.

$$E_{c;0} = v_f E_f + v_m E_m$$

Waarin:

$E_{c;0}$ = E – modulus in vezelrichting

E_f = E – modulus vezels

E_m = E – modulus hars

Uitkomst

$$E_{c;0} = 0,6 * 73100 + (1 - 0,6) * 2500$$

$$E_{c;0} = 44860 \text{ MPa}$$

De stijfheid loodrecht op de vezelrichting wordt bepaald met de methode Halpin-Tsai. Als eerste stap wordt er aangenomen dat alle vezels in dezelfde richting liggen.

$$E_{c;90} = 2 * (1 - V_m * v_m - V_f * v_f) * \left[(1 - C_c) * \frac{2 * C_m * C_f + K_c * G_m}{2 * K_{c;min} + G_m} + C_c * \frac{2 * C_m * C_f + K_c * G_f}{2 * K_{c;1} + G_f} \right]$$

Waarin:

$E_{c;90}$ = E – modulus loodrecht op vezelrichting

v_f = poisson ratio vezels

v_m = poisson ratio hars

C_c = filament contiguity factor

C_f = Stijfheidsmatrix vezels

C_m = Stijfheidsmatrix hars

K_c = Maximale stijfheid

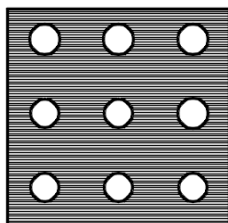
$K_{c;min}$ = minimale stijfheid

G_f = Glijdingsmodulus vezels

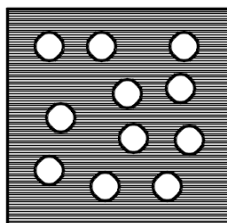
G_m = Glijdingsmodulus hars

Tussenparameters

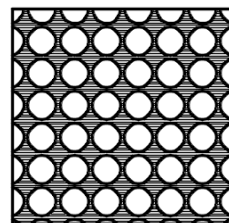
De ligging van de vezels kunnen variëren van compleet geïsoleerde vezels (links in de onderstaande figuur) tot een compleet gesloten vezelnetwerk (rechts in de onderstaande figuur). In werkelijkheid zullen de vezels meer liggen zoals het middelste schema in de onderstaande figuur weergeeft, wat dus een C_c geeft met een waarde tussen de 0 en 1. In de praktijk is gebleken dat deze waarde niet hoger wordt dan 0,4 en dat het meestal tussen de 0,2 en 0,3 ligt.



$C_c = 0$



$0 < C_c < 1$



$C_c = 1$

Aangenomen wordt dat de waarde voor C_c gelijk is aan 0,25.

$$C_f = \frac{E_f}{2(1 - v_f)} = \frac{73100}{2(1 - 0,24)} = \mathbf{48092,11 \text{ MPa}}$$

$$C_m = \frac{E_m}{2(1 - v_m)} = \frac{2500}{2(1 - 0,38)} = \mathbf{2016,13 \text{ MPa}}$$

$$K_c = V_f C_f + V_m C_m = 0,6 * 48092,11 + (1 - 0,6) * 2016,13 = \mathbf{29661,71 \text{ MPa}}$$

$$K_{c;1} = V_m C_f + V_f C_m = (1 - 0,6) * 48092,11 + 0,6 * 2016,13 = \mathbf{20446,52 \text{ MPa}}$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + v_f)} = \frac{73100}{2(1 + 0,24)} = \mathbf{29475,81 \text{ MPa}}$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} = \frac{2500}{2(1 + 0,38)} = \mathbf{905,80 \text{ MPa}}$$

Uitkomst

$$E_{c;90} = 2 * (1 - (1 - 0,6) * 0,38 - 0,6 * 0,24) * \left[\frac{(1 - 0,25) * \frac{2 * 2016,13 * 48092,11 + 29661,71 * 905,80}{2 * 20446,52 + 905,80}}{0,25 * \frac{2 * 2016,13 * 48092,11 + 29661,71 * 29475,81}{2 * 20446,52 + 29475,81}} + \right]$$

$$E_{c;90} = 10921,42 \text{ MPa}$$

Om tot de juiste E-modulussen te komen, worden de gevonden waarden voor de E-modulussen in beide richtingen met het percentage vezels in de richtingen vermenigvuldigd. Deze methode is gebaseerd op pagina 38 van het boek 'vezelversterkte kunststoffen – mechanica en ontwerp'.

$$E'_{c;0} = 0,8 * E_{c;0} + 0,2 * E_{c;90}$$

$$E'_{c;0} = 0,8 * 44860 + 0,2 * 10921,42$$

$$\mathbf{E'_{c;0} = 38072,28 \text{ MPa}}$$

$$E'_{c;90} = 0,2 * E_{c;0} + 0,8 * E_{c;90}$$

$$E'_{c;90} = 0,2 * 44860 + 0,8 * 10921,42$$

$$\mathbf{E'_{c;90} = 17709,13 \text{ MPa}}$$

De glijdingsmodulus wordt bepaald met de methode Halpin-Tsai.

$$G_{12} = C_c * G_f * \frac{G_c + G_m}{G_{c,min} + G_f} + (1 - C_c) * G_m * \frac{G_c + G_f}{G_{c,min} + G_m}$$

Waarin:

G_c = maximale glijdingsmodulus

$G_{c,min}$ = minimale glijdingsmodulus

Tussenparameters

$$G_c = V_f G_f + V_m G_m = 0,6 * 29475,81 + (1 - 0,6) * 905,80 = 18047,80 \text{ MPa}$$

$$G_{c,min} = V_m G_f + V_f G_m = (1 - 0,6) * 29475,81 + 0,6 * 905,80 = 12333,80 \text{ MPa}$$

Uitkomst

$$G_{12} = 0,25 * 29475,81 * \frac{18047,80 + 905,80}{12333,80 + 29475,81} + (1 - 0,25) * 905,80 * \frac{18047,80 + 29475,81}{12333,80 + 905,80}$$

$$\mathbf{G_{12} = 5779,10 \text{ MPa}}$$

Poisson ratio

De stijfheid loodrecht op de vezelrichting wordt bepaald met de methode Halpin-Tsai.

$$\nu_{12} = C_c * \frac{2 * C_m * C_f * \nu_c + C_{c,1} * G_f}{2 * C_m * C_f + C_c * G_f} + (1 - C_c) * \frac{2 * C_m * C_f * \nu_c + C_{c,1} * G_m}{2 * C_m * C_f + C_c * G_m}$$

Waarin:

ν_c = poisson ratio volgens mengselregel

C_c = stijfheidsmatrix composiet

$C_{c,1}$ = dwarscontractie composiet

Op basis van evenredigheid wordt de poisson-factor in de 21-richting bepaald.

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} E'_{c;90}}{E'_{c;0}}$$

Tussenparameters

$$\nu_c = V_f \nu_f + V_m \nu_m = 0,6 * 0,24 + (1 - 0,6) * 0,38 = 0,30$$

$$C_c = V_f C_f + V_m C_m = 0,6 * 48092,11 + (1 - 0,6) * 2016,13 = 29661,71 \text{ MPa}$$

$$C_{c,1} = V_f C_f \nu_f + V_m C_m \nu_m = 0,6 * 48092,11 * 0,24 + (1 - 0,6) * 2016,13 * 0,38 = 7231,71 \text{ MPa}$$

Uitkomst

$$\nu_{12} = 0,25 * \frac{2 * 2016,13 * 48092,11 * 0,30 + 7231,71 * 29475,81}{2 * 2016,13 * 48092,11 + 29661,71 * 29475,81} + (1 - 0,25) * \frac{2 * 2016,13 * 48092,11 * 0,30 + 7231,71 * 905,80}{2 * 2016,13 * 48092,11 + 29661,71 * 905,80}$$

$$\nu_{12} = 0,28$$

$$\nu_{21} = \frac{0,28 * 17709,13}{38072,28}$$

$$\nu_{21} = 0,13$$

Sterkte

De sterkte van het composiet wordt bepaald aan de hand van de beschreven methode op pagina 53 van het boek 'vezelversterkte kunststoffen – mechanica en ontwerp'.

Volgens de CUR 96 moet de sterkte worden bepaald en getoetst volgens aan de volgende waarden:

- Trekspanning in vezelrichting;
- Drukspanning in vezelrichting;
- Trekspanning loodrecht op de vezelrichting;
- Drukspanning loodrecht op de vezelrichting;
- Schuifspanning tussen deze twee richtingen.

De trek-, druk en schuifspanning wordt bepaald met de wet van Hooke, die er in dit geval zo uitziet:

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^6 S_{ij} \sigma_j$$

Waarin:

i = richting (1 t/m 6)

j = de trek- druk- of afschuif richting

ε_i = rek

S_{ij} = compliantie component

σ_j = spanning

Om deze formule te verduidelijken wordt het ook in matrixvorm gezet:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}$$

Als er een rechtsdraaiend orthogonaal assenstelsel met een x_1x_2 -vlak wordt gekozen, kan er worden verondersteld dat de spanningen in de richting 3 en vlakken 4 en 5 gelijk zijn aan 0.

$$\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = 0$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & 0 & 0 & 0 & S_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{61} & S_{62} & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{26} \\ S_{61} & S_{62} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}$$

In het geval van orthotropie waarbij het eerder genoemde vlak een symmetrievlak is, kan er ook worden verondersteld dat er geen afschuifstijfheid aanwezig is in de richtingen 1 en 2. Nu kan de matrix worden vereenvoudigen tot:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix}$$

Waarin:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Uitkomst

$$Q_{11} = \frac{38072,28}{1 - 0,28 * 0,13} = 39519,18 \text{ MPa}$$

$$Q_{12} = \frac{0,13 * 38072,28}{1 - 0,28 * 0,13} = 5157,24 \text{ MPa}$$

$$Q_{21} = \frac{0,28 * 17709,13}{1 - 0,28 * 0,13} = 5157,24 \text{ MPa}$$

$$Q_{22} = \frac{17709,13}{1 - 0,28 * 0,13} = 18382,15 \text{ MPa}$$

$$Q_{66} = 5779,10 \text{ MPa}$$

Trek- en schuifspanning

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 39519,18 & 5157,24 & 0 \\ 5157,24 & 18382,15 & 0 \\ 0 & 0 & 5779,10 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0,02 \\ 0,002 \\ 0,019 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 893,53 \\ 47,08 \\ 109,80 \end{Bmatrix} \text{ MPa}$$

Druk- en schuifspanning

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 39519,18 & 5157,24 & 0 \\ 5157,24 & 18382,15 & 0 \\ 0 & 0 & 5779,10 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0,02 \\ 0,002 \\ 0,019 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 536,12 \\ 211,85 \\ 109,80 \end{Bmatrix} \text{ MPa}$$

Net als bij de E-modulus worden de volgende formules toegepast om de juiste waarden te vinden .

$$\sigma'_{t,1} = 0,8 * \sigma_{t,1} + 0,2 * \sigma_{t,2}$$

$$\sigma'_{t,1} = 0,8 * 893,53 + 0,2 * 47,08$$

$$\sigma'_{t,1} = \mathbf{724,24 \text{ MPa}}$$

$$\sigma'_{t,2} = 0,2 * \sigma_{t,1} + 0,8 * \sigma_{t,2}$$

$$\sigma'_{t,2} = 0,2 * 893,53 + 0,8 * 47,08$$

$$\sigma'_{t,2} = \mathbf{216,37 \text{ MPa}}$$

$$\sigma'_{c,1} = 0,8 * \sigma_{c,1} + 0,2 * \sigma_{c,2}$$

$$\sigma'_{c,1} = 0,8 * 536,12 + 0,2 * 211,85$$

$$\sigma'_{c,1} = \mathbf{471,26 \text{ MPa}}$$

$$\sigma'_{c,2} = 0,2 * \sigma_{c,1} + 0,8 * \sigma_{c,2}$$

$$\sigma'_{c,2} = 0,2 * 536,12 + 0,8 * 211,85$$

$$\sigma'_{c,2} = \mathbf{276,71 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{12} = \mathbf{109,80 \text{ MPa}}$$

Lineaire thermische uitzetting

De lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt in de vezelrichting en loodrecht op de vezelrichting wordt bepaald met de methode Schapery.

$$\alpha_1 = \frac{V_f E_f \alpha_f + V_m E_m \alpha_m}{V_f E_f + V_m E_m}$$

$$\alpha_2 = V_f(1 + \nu_f)\alpha_f + V_m(1 + \nu_m)\alpha_m - (V_f \nu_f + V_m \nu_m)\alpha_1$$

Waarin:

α_1 = lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt in de vezelrichting

α_2 = lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt loodrecht op de vezelrichting

α_f = lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt van de vezels

α_m = lineaire thermische uitzettingscoëfficiënt van de hars

Uitkomst

$$\alpha_1 = \frac{0,6 * 73100 * \alpha_f + (1 - 0,6) * 2500 * 50 * 10^{-6}}{0,6 * 73100 + (1 - 0,6) * 2500} = 6 * 10^{-6}/K$$

$$\alpha_2 = 0,6(1 + 0,24) * 5 * 10^{-6} + (1 - 0,6)(1 + 0,38) * 50 * 10^{-6} - (0,6 * 0,24 + (1 - 0,6) * 0,38) * 6 * 10^{-6} = 29,5 * 10^{-6}/K$$

Hogeschool Rotterdam / Gemeente Rotterdam

VVK tuibrug

Bijlage II – Beschouwing ringvaartplasbrug

Naam:	Lennart Kraaijenbrink
Studentnummer:	0884858
Versie:	1.0 (definitief)
Datum:	dinsdag 13 juni 2017

Inhoud

Inleiding	2
Beschouwing stalen ringvaartplasbrug	3
Opmerkingen op berekening stalen brug	4
Invoer MatrixFrame	4
Geometrie	4
Profielgegevens	4
Opleggingen	5
Staafaansluitingen	5
Lastdefinitie en belastingcombinaties	5
Temperatuurbelasting	5
Uitvoer MatrixFrame	6
Eigenfrequentie brugdek	6
Krachtsverdeling pyloon	7
Krachtsverdeling brugdek	7
Bijlagen	8
Bijlage A – 3D rekenmodel rapport	9
Bijlage B – 2D rekenmodel rapport	10

Inleiding

Er bestaan al talloze bruggen in hout, beton en staal. Tegenwoordig hebben bruggen van vezelversterkt kunststof (VVK) bewezen dat ze goed toe te passen zijn op korte overspanningen. Deze overspanningen gaan tot ongeveer 30 meter. Om het als serieuze concurrentie te zien van de conventionele materialen zal VVK zich ook moeten bewijzen op grotere overspanningen.

In dit onderzoek wordt er een VVK brug met een overspanning van 100 meter beschouwd. Wanneer er glasvezels worden toegepast in het composiet is een vrije overspanning van 30 meter al moeilijk te halen met een VVK brug, laat staan 100 meter. Er wordt daarom onderzocht hoe een VVK brug eruit moet komen te zien in de vorm van een tuibrug.

Als referentiebrug wordt de ringvaartplasbrug gebruikt. Deze tuibrug heeft een overspanning van 107 meter met 20 meter tussen de tuien in. Het brugdek haalt zijn stijfheid uit de constructief meewerkende vakwerkleuning. Hierdoor kon het brugdek zeer slank worden ontworpen.

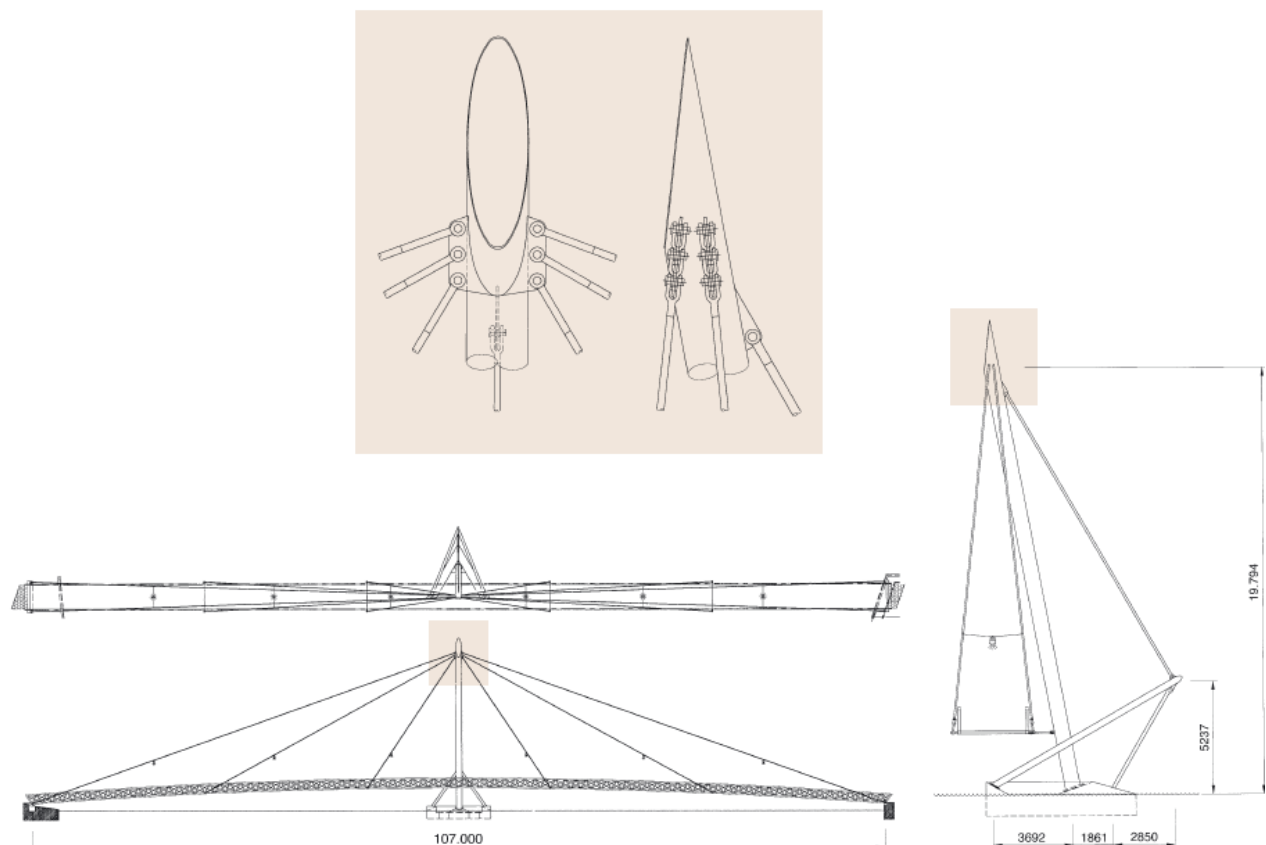
Om een goed beeld te krijgen van de bestaande ringvaartplasbrug wordt de brug in het programma MatrixFrame gemodelleerd. Hieruit kan worden geconcludeerd of de verschillen tussen de originele berekeningen en het MatrixFrame model aannemelijk zijn en waar de verschillen vandaan komen.

Beschouwing stalen ringvaartplasbrug

De ringvaartplasbrug is een tuibrug waarbij de bovenbouw volledig uit staal bestaat. Het is een brug die onderdeel is uit een reeks bruggen in dezelfde regio. Al die bruggen hebben dezelfde uitgangspunten met als één van deze punten het minimaliseren van het gewicht. In de meeste gevallen van de reeks bruggen komt dit voordelig uit, maar bij de ringvaartplasbrug, de enige tuibrug van de reeks, kwam het minder voordelig uit. In tuibruggen nemen de dynamische effecten toe als het eigen gewicht, in verhouding met de veranderlijke belasting, afneemt. Als de tuien niet genoeg spanning in zich hebben, worden de eigenfrequenties ongunstig laag. Dit effect wordt versterkt wanneer de brug asymmetrisch is belast, waardoor sommige tuien extra ontlast worden.

Om de dynamische effecten in het brugdek op te vangen is er een hoge stijfheid vereist. De stijfheid in de verticale richting wordt behaald met behulp van 2 dragende vakwerkleuningingen. In de laterale richting wordt de stijfheid behaald door trogliggers dwars te leggen in het brugdek.

De pyloon staat onder een hoek zodat de top van de pyloon recht boven het brugdek staat. De pyloon is opgebouwd uit een stalen buisprofiel als mast van de pyloon, 2 stalen buisprofielen als schoren, een trekstang en een tui om de punt van de pyloon te stabiliseren. De pyloon wordt niet alleen door de achtertui gestabiliseerd, maar ook door de verankeringsluiken ter plaatse van het landhoofd. Er komt weliswaar weinig spanning op deze tuien te staan, maar ze zijn onmisbaar.



Figuur BII.1

Het maatgevende faalmechanisme voor de pyloon is knik. De maximale druk in de pyloon wordt bereikt met de combinatie van eigen gewicht + veranderlijke belasting (gehele dek) + zettingen van het landhoofd.

Opmerkingen op berekening stalen brug

De constructeur van de ringvaartplasbrug, Jaco Reusink, gaf aan dat niet de juiste berekening bewaard was gebleven van de ringvaartplasbrug. Om een goed vergelijk te maken zijn dezelfde fouten ook meegenomen in de VVK variant van de brug. De relevante fouten uit de berekening zijn:

- De mast van de pyloon wordt beschouwd als een staaf met aan een kant een inklemming en aan de andere kant een scharnier. Dit geeft een L_{buc} van 0,7L. Echter vormen de tuien geen vast scharnier noch een vrije uitkraging. Dit betekent dus dat de werkelijke kniklengte tussen de 0,7L en de 2,0L zit. In een rekenmodel komt de kniklengte uit op ongeveer 1,0L.
- Wanneer er in het MatrixFrame-model de temperatuursbelasting in de achtertui op de pyloon achterwegen wordt gelaten, komen de waardes nagenoeg overeen met de waardes in de berekening van de stalen brug. Wanneer de temperatuurbelasting er wel op wordt gezet, worden er grote afwijkingen geconstateerd. Hieruit wordt geconcludeerd dat de temperatuurbelasting in de achtertui in het rekenmodel van de stalen brug niet is meegenomen of er is iets fout gegaan in de rest van de tuien. In het berekeningsrapport van de stalen brug worden namelijk verschillende temperatuurbelastingen gevonden voor dezelfde tuien. Aangenomen wordt dat het eerste het geval is. Hiermee komen de waardes uit het nieuwe MatrixFrame-model namelijk overeen met de waardes van de stalen brug.
- De eigenfrequentie van de stalen brug is niet goed bepaald. Bij het bepalen van de eigenfrequentie zijn de tuien genegeerd en is de volledige 107 meter als overspanning gepakt in de formule voor een ligger op 2 scharnierende steunpunten. De juiste manier is om de tuien als verende opleggingen te beschouwen en het vervolgens met de hand of met een computermodel uit te rekenen. Aan te raden is om het met een computermodel te doen, omdat het met de hand bijna onmogelijk is.

Invoer MatrixFrame

Geometrie

De stramienafmetingen zijn hetzelfde als de bestaande brug. Er zijn knopen waar de tuien zijn vastgemaakt aan het brugdek, daartussen zijn er rechte staven getrokken.

Profielgegevens

De volgende profielen zijn er gebruikt in het model:

Tabel BII.1

Onderdeel	Profiel	Profielgegevens
Brugdek	Trogligger (handmatige invoer)	E-modulus: 210.000 MPa $I_t = 0,1841 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$ $I_y = 5,1423 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$ $I_z = 3,9267 \cdot 10^{-2} \text{ m}^4$ $A = 0,02391 \text{ m}^2$
Mast (pyloon)	Ø711-20, S355	E-modulus: 210.000 MPa
Schoren (pyloon)	Ø273-16, S355	E-modulus: 210.000 MPa
Trekstaaf (pyloon)	Ø150-massief, S355	E-modulus: 210.000 MPa
Tui (pyloon/achter)	Ø45-massief, Fe1650B	E-modulus: 205.000 MPa
Tuien	Ø32,8-massief, Fe1650B	E-modulus: 200.000 MPa

De tuien in de model wijken af van de werkelijkheid, namelijk 22Ø7 en 42Ø7 in de pyloon. De EA van de tuien zijn gelijk gehouden t.b.v. de uitrekking van de tuien.

Opleggingen

In zowel de X-richting als in de Y-richting is er een vrije oplegging gemaakt in het model. Er is uitgegaan van zakkingen van 15 mm bij de landhoofden. Door dit te realiseren zijn de opleggingen in de Z-richting verend opgelegd. Door een puntlast van 15.000 kN op de opleggingen te plaatsen geeft dit een veerconstante k van 1.000.000 kNm ($k=F/\delta$).

Tabel BII.2

Oplegging	X	Y	Z	Xr	Yr	Zr
Landhoofd links 1	Vast	Vrij	Veer ($k=1.000.000$ kNm)	Vrij	Vrij	Vrij
Landhoofd links 2	Vast	Vast	Veer ($k=1.000.000$ kNm)	Vrij	Vrij	Vrij
Landhoofd rechts 1	Vrij	Vrij	Veer ($k=1.000.000$ kNm)	Vrij	Vrij	Vrij
Landhoofd rechts 2	Vrij	Vast	Veer ($k=1.000.000$ kNm)	Vrij	Vrij	Vrij
Mast (pyloon)	Vast	Vast	Vast	Vast	Vast	Vast
Schoren (pyloon)	Vast	Vast	Vast	Vrij	Vrij	Vrij
Trekstaaf (pyloon)	Vast	Vast	Vast	Vrij	Vrij	Vrij

Staafaansluitingen

Alle tuien zijn aan beiden kanten scharnierend verbonden. De rest van de knopen zijn momentvast.

Lastdefinitie en belastingcombinaties

De belastingen en belastingcombinaties zijn hetzelfde als in de oude berekening. Het programma is op de norm 'NEN' gezet.

Temperatuurbelasting

De tuiverspanning, de permanent belasting in de tuien ten gevolge van het eigen gewicht, wordt in het rekenmodel meegenomen door een verkorting van de tuien. Dit wordt door middel van een negatieve temperatuurbelasting aangebracht. Volgens de wet van Hooke is de uitrekking van een staaf gelijk aan vergelijking BII.1.

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA} \quad [\text{BII.1}]$$

De E-modulus in de wet van Hooke wordt berekend met de formule van Ernst (vergelijking BII.2). Met deze waarde wordt ook de k-factor bepaald.

$$E_F = \frac{E_0}{1 + \frac{100 \cdot L_{hor}^2 \cdot \rho^2 \cdot E_0}{12 \cdot \sigma^3}} \quad [\text{BII.2}]$$

Waarin:

E_F = fictieve E – modulus tuien [MPa]

E_0 = startwaarde E – modulus [MPa]

L_{hor} = horizontale project van de tui [mm]

De berekende verlenging van de tuien worden opgeheven met behulp van vergelijking BII.3.

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \quad [\text{BII.3}]$$

Waarin:

α = lineaire uitzettingscoëfficiënt

ΔT = temperatuursverschil [K]

van krachten ontbinden. Dit geeft vergelijking BII.5 als formule voor de in te voeren k-factor in het rekenmodel.

$$k' = \frac{EA}{L} \cos \alpha \quad [\text{BII.5}]$$

Tabel BII.5

Eigenvorm	Eigenwaarde	Natuurlijke rotatiefrequentie	Natuurlijke frequentie	Periode
1	0.067267	14.866	2.366	0.423
2	0.066655	15.003	2.388	0.419
3	0.045971	21.753	3.462	0.289
4	0.040750	24.540	3.906	0.256
5	0.035193	28.415	4.522	0.221
6	0.022066	45.319	7.213	0.139
7	0.017441	57.337	9.126	0.110
8	0.014217	70.336	11.194	0.089
9	0.010949	91.336	14.537	0.069
10	0.008632	115.843	18.437	0.054

Krachtsverdeling pyloon

Voor de krachtsverdeling in de pyloon wordt verwezen naar bijlage A.

De waardes van het rekenmodel komen ongeveer overeen met de waardes van de oude berekening.

Krachtsverdeling brugdek

Voor de krachtsverdeling in de pyloon wordt verwezen naar bijlage B.

De waardes van het rekenmodel komen ongeveer overeen met de waardes van de oude berekening.

Bijlagen

Overzicht bijlagen

- Bijlage A – 3D rekenmodel rapport
- Bijlage B – 2D rekenmodel rapport

Bijlage A – 3D rekenmodel rapport

Bijlage B – 2D rekenmodel rapport

Hogeschool Rotterdam / Gemeente Rotterdam

VVK brug grote overspanning

Bijlage III – Berekening pyloon

Naam:	Lennart Kraaijenbrink
Studentnummer:	0884858
Versie:	1.0 (definitief)
Datum:	dinsdag 13 juni 2017

Inhoud

Inleiding	3
1. Uitgangspunten	4
Normen & voorschriften	4
Materialen	4
Ontwerpcriteria	4
Belasting-, conversie & materiaalfactoren	5
Belastingcombinaties	5
Belastingen	5
Gebruikte software.....	5
2. Brugdek varianten	6
Variant 1: sandwichconstructie.....	6
Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)	6
Variant 2: trogconstructie VVK geïntegreerd	7
Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)	7
Variant 3: trogconstructie VVK/staal geïntegreerd	8
Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)	8
Variant 4: trogconstructie VVK boutverbindingen	9
Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)	9
Variant 5: trogconstructie VVK/staal boutverbindingen	10
Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)	10
3. trillingen en comfort.....	11
4. Toetsing op trillingen en comfort.....	13
Variant 1.....	13
Eigenfrequentie	13
Situatie 1	13
Situatie 2	14
Situatie 3	14
Variant 2.....	15
Eigenfrequentie	15
Situatie 1	15
Situatie 2	16
Situatie 3	16
Variant 3.....	17
Eigenfrequentie	17
Situatie 1	17

Situatie 2	18
Situatie 3	18
Variant 4.....	19
Eigenfrequentie	19
Situatie 1	19
Situatie 2	20
Situatie 3	20
Variant 5.....	21
Eigenfrequentie	21
Situatie 1	21
Situatie 2	22
Situatie 3	22
Toetsing op sterkte.....	23
Variant 1.....	23
Trekspanning in de huiden tgv buigend moment.....	23
Dwarskracht in de lijven	24
Variant 2.....	25
Trekspanning in de huid tgv buigend moment.....	25
Dwarskracht in de lijven	26
Variant 3.....	27
Trekspanning in de huiden tgv buigend moment.....	27
Dwarskracht in de lijven	28
Variant 4.....	29
Trekspanning in de huiden tgv buigend moment.....	29
Dwarskracht in de lijven	30
Variant 5.....	31
Trekspanning in de huiden tgv buigend moment.....	31
Dwarskracht in de lijven	32
Kosten	33
Conclusie.....	34

Inleiding

Er bestaan al talloze bruggen in hout, beton en staal. Tegenwoordig hebben bruggen van vezelversterkt kunststof (VVK) bewezen dat ze goed toe te passen zijn op korte overspanningen. Deze overspanningen gaan tot ongeveer 30 meter. Om het als serieuze concurrentie te zien van de conventionele materialen zal VVK zich ook moeten bewijzen op grotere overspanningen.

In dit onderzoek wordt er een VVK brug met een overspanning van 100 meter beschouwd. Wanneer er glasvezels worden toegepast in het composiet is een vrije overspanning van 30 meter al moeilijk te halen met een VVK brug, laat staan 100 meter. Er wordt daarom onderzocht hoe een VVK brug eruit moet komen te zien in de vorm van een tuibrug. Als referentiebrug wordt de ringvaartplasbrug gebruikt.

Om uit te zoeken wat een goede VVK variant voor het brugdek is worden er verschillende opties bekeken. Hieruit wordt de beste variant gekozen op constructieve veiligheid en kosten. De constructieve veiligheid wordt getoetst op comfort van de gebruiker van de brug en de sterkte van de brug. De laterale trilling wordt in dit bestand niet getoetst. In de definitieve variant zal hierop ontworpen worden. De krachtsverdeling in het brugdek wordt uit het programma MatrixFrame gehaald.

1. Uitgangspunten

Ten behoeve van de correctheid van de materiaaleigenschappen en factoren worden de waardes aangehouden zoals staat aangegeven in het document van InfraCore 'Dit is InfraCore Inside – Ontwerp en eigenschappen (revisie 010, 25 juli 2014)'. De achtergronden van de materiaaleigenschappen en factoren worden in dit bestand niet behandeld.

Normen & voorschriften

NEN 6702:1991	Belastingen en vervormingen (+ wijzigingen)
NEN 6770:1991	basiseisen (+ wijzigingen)
NEN 6771:1991	stabiliteit (+ wijzigingen)
NEN 6788:1991	VOSB 1990 (ontwerp)
CUR-aanbeveling 96 (2003)	Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies
CUR-aanbeveling 96 (1 ^e herziene uitgave)	Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies
EUR 23984 EN	Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations

Materialen

Staalkwaliteit: S355

VVK materiaal:

Tabel BIII.1

Eigenschap	Eenheid	Huiden	Randen	Vlakke lijfplaten	Dwarsverstijvers
ρ	kg/m ³	1912	1912	1584	1584
E1	Mpa	32300	25200	13800	8560
E2	Mpa	17400	25200	13800	8560
G12	Mpa	5600	5800	2930	6100
σ_{1t}	Mpa	558	334	217	75
σ_{2t}	Mpa	166	334	217	75
σ_{1c}	Mpa	269	209	198	84
σ_{2c}	Mpa	149	209	198	84
τ_{12}	Mpa	39	39	38	149

Tabel BIII.2

Laminaat	Vezelrichtingen	Vezelrichtingfracties	Vezelvolumegehalte
Huiden	0/90°	75/25%	0,52
Randen	0/90°	50/50%	0,52
Vlakke lijfplaten	0/90°	50/50%	0,28
Dwarsverstijvers	±45°	50/50%	0,28

Ontwerpcriteria

Gevolgklasse:	CC2
Referentieperiode:	100 jaar
Windgebied:	II

Belasting-, conversie & materiaalfactoren

Permanente belasting: $\gamma_{G,j,\text{sup}} = 1,5$

$\gamma_{G,j,\text{inf}} = 0,9$

Veranderlijke belasting: $\gamma_Q = 1,5$

Materiaalfactor BGT: $\gamma_{\text{BGT}} = 1$

Materiaalfactor UGT: $\gamma_{\text{UGT}} = 1,62$

Conversiefactoren:

Tabel BIII.3

Conversiefactor		Uiterste grenstoestand			Bruikbaarheidsgrenstoestand		
		STR/GEO (Sterkte) γ_{CS}	EQU (Stabiliteit) γ_{CK}	FAT (Vermoeiing) γ_{CV}	Vervorming γ_{CD}	Trillingen γ_{CT}	Eerste scheurvorming γ_{C1}
Temperatuur	γ_{CT}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Vocht	γ_{CV}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Kruip	γ_{CK}	1,26	1,26		1,26		1,26
Vermoeiing	γ_{CF}		1,1		1,1	1,1	1,1
Kortdurend	$\gamma_{\text{C-K}}$	1,21	1,33	1,21	1,21	1,21	1,33
Langdurend	$\gamma_{\text{C-1}}$	1,52	1,68	1,21	1,68	1,33	1,68

Belastingcombinaties

Er worden dezelfde belastingcombinaties gehanteerd als de belastingcombinaties gebruikt in het ontwerp van de ringvaartplasbrug. De maatgevende belastingcombinaties zijn terug te vinden in de berekening.

Belastingen

Er worden dezelfde belastingen gehanteerd als de belastingen gebruikt in het ontwerp van de ringvaartplasbrug.

Gebruikte software

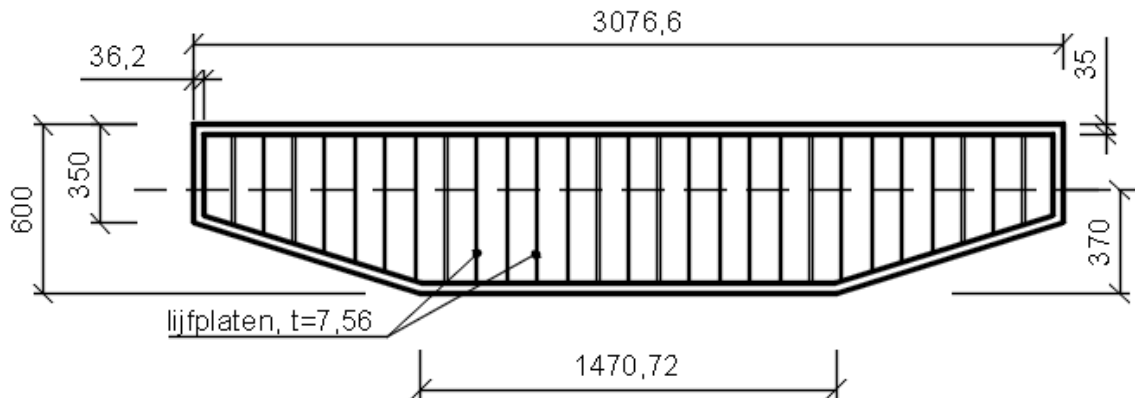
AutoCad 2015

MatrixFrame 5.2.9

2. Brugdek varianten

Variant 1: sandwichconstructie

Het dek heeft een hoogte van 600 mm en bij de zijkanten een hoogte van 350 mm. Er is voor deze opbouw gekozen omdat de minimale benodigde hoogte, ten gevolg van dwarskracht op de lijven, 350 mm is. Echter heeft een dek van 350 mm hoogte over de gehele breedte niet genoeg stijfheid. Daar dient de verhoging naar 600 mm voor. Door de (dikke) huid verder van de neutrale lijn te plaatsen, wordt het traagheidsmoment verhoogd volgens de regel van Steiner. De randen zijn relatief dik. Dit komt omdat de rand de leuning moet kunnen dragen.



Figuur BIII.1

Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)

Eigen gewicht constructie (incl. leuning, slijtslaag, etc.): 9,375 kN/m¹

Gewogen traagheidsmoment: 1241627*10⁴ mm⁴

k-factor verend scharnier buitenste tui: 1120,45 MPa

k-factor verend scharnier middelste tui: 2468,85 MPa

k-factor verend scharnier binnenste tui: 7123,76 MPa

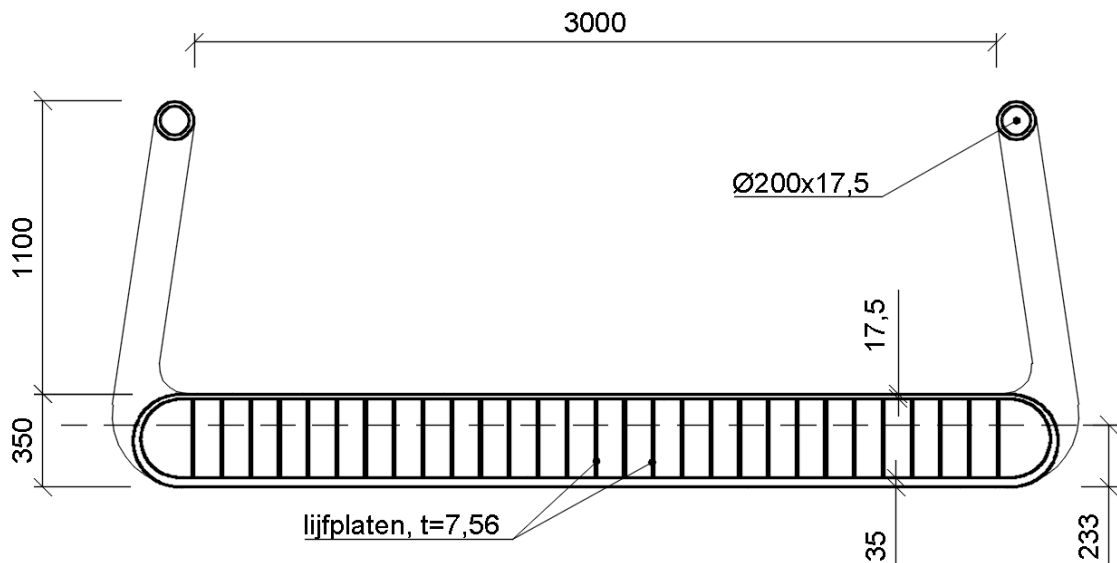
Variant 2: trogconstructie VVK geïntegreerd

Het grote voordeel van deze constructie is dat het traagheidsmoment enorm wordt verhoogd. Doordat de buisprofielen erg hoog zitten van de neutrale lijn heeft dit heel veel invloed op het traagheidsmoment.

Voordelen hiervan zijn:

- Er kan slanker gebouwd worden;
- De eigenfrequenties worden verhoogd;
- Doorbuigingen worden minder.

Met deze variant wordt de leuning met het dek geïntegreerd. Het grote nadeel hiervan is dat dit erg prijzig is.



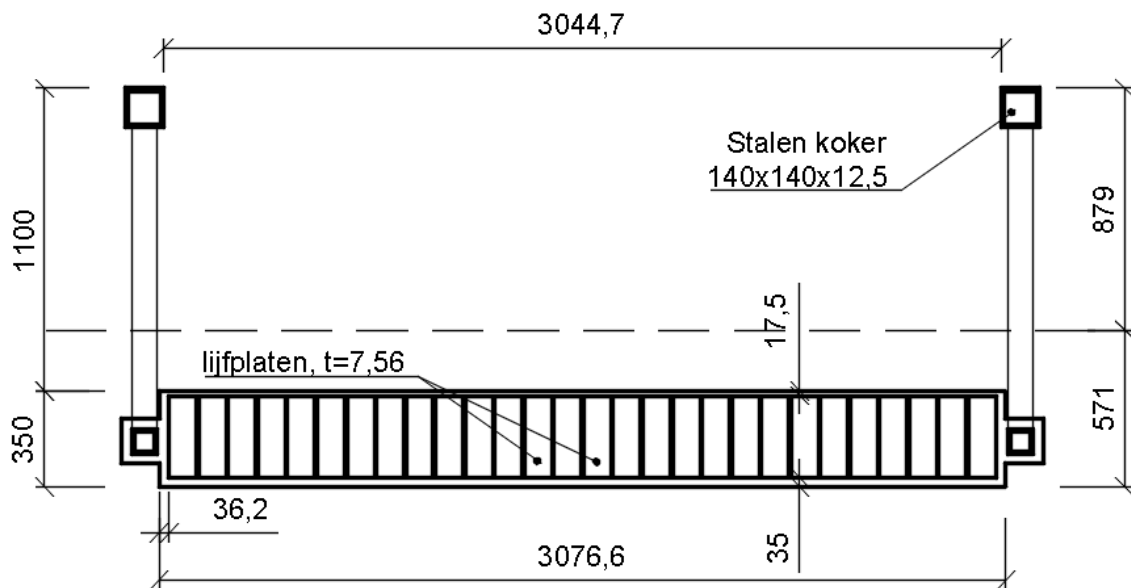
Figuur BIII.2

Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)

Eigen gewicht constructie (incl. slijtslaag, etc.):	6,837 kN/m ¹
Gewogen traagheidsmoment:	4140644*10 ⁴ mm ⁴
k-factor verend scharnier buitenste tui:	1111,49 MPa
k-factor verend scharnier middelste tui:	2432,06 MPa
k-factor verend scharnier binnenste tui:	6696,94 MPa

Variant 3: trogconstructie VVK/staal geïntegreerd

Als derde variant wordt er een VVK sandwichconstructie toegepast met een geïntegreerde stalen vakwerk die dient als leuning. Dit is in de productie goedkoper, maar er leuning moet in zijn levensduur vaker onderhouden worden dan een leuning van VVK. Ook is deze variant iets zwaarder dan variant 2.



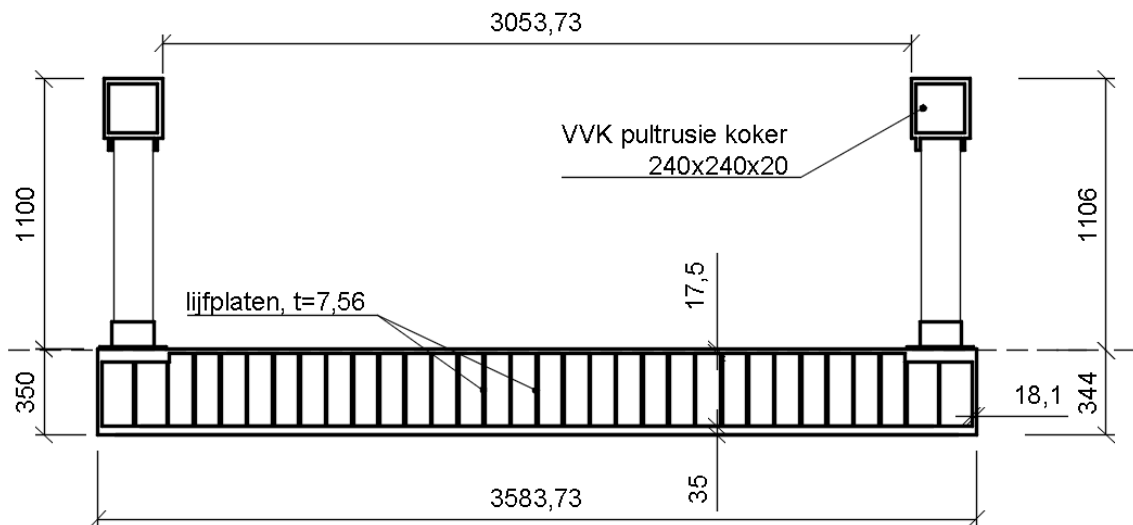
Figuur BIII.3

Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)

Eigen gewicht constructie (incl. slijtslaag, etc.):	7,537 kN/m ¹
Gewogen traagheidsmoment:	14810068*10 ⁴ mm ⁴
k-factor verend scharnier buitenste tui:	1114,32 MPa
k-factor verend scharnier middelste tui:	2446,18 MPa
k-factor verend scharnier binnenste tui:	6862,96 MPa

Variant 4: trogconstructie VVK boutverbindingen

Bij deze variant wordt de VVK vakwerkleuning met bouten vastgemaakt aan het dek, zodat het op die manier samenwerkt. Dit is goedkoper in productie maar het heeft wel veel bout- en lijmverbindingen nodig.



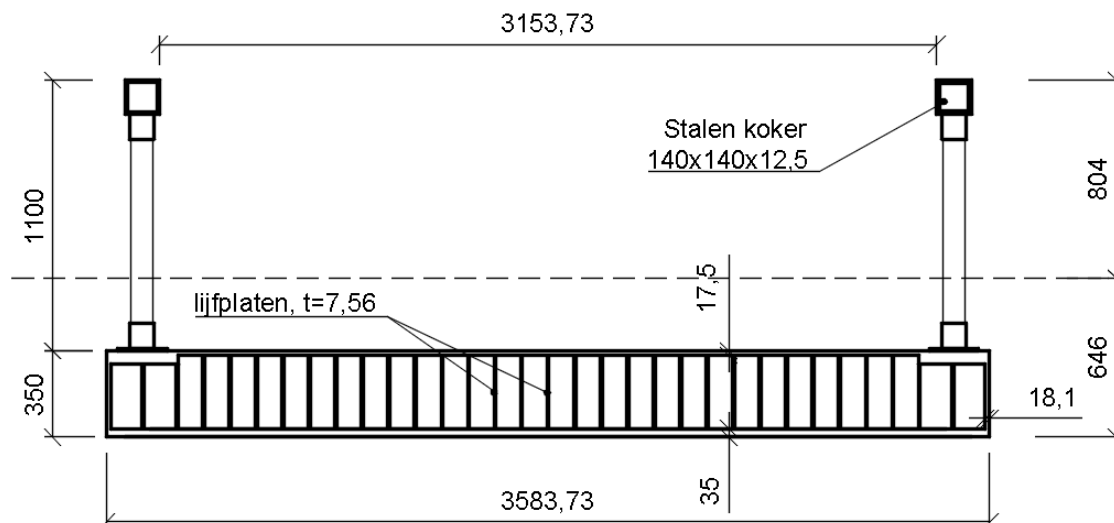
Figuur BIII.4

Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)

Eigen gewicht constructie (incl. slijtslaag, etc.):	7,905 kN/m ¹
Gewogen traagheidsmoment:	6679429*10 ⁴ mm ⁴
k-factor verend scharnier buitenste tui:	1115,25 MPa
k-factor verend scharnier middelste tui:	2450,36 MPa
k-factor verend scharnier binnenste tui:	6911,53 MPa

Variant 5: trogconstructie VVK/staal boutverbindingen

Deze variant heeft een stalen vakwerkleuning die op het brugdek vastgemaakt wordt. Het grote voordeel van deze variant ten opzichte van variant 3, is dat de leuning in delen op het brugdek geplaatst kan worden. Dit geeft de mogelijkheid om de leuning thermisch te verzinken, waardoor het minder onderhoud nodig heeft.



Figuur BIII.5

Gegevens brugdoorsnede (invoer MatrixFrame)

Eigen gewicht constructie (incl. slijtslaag, etc.):	8,223 kN/m ¹
Gewogen traagheidsmoment:	1386945*10 ⁴ mm ⁴
k-factor verend scharnier buitenste tui:	1116,57 MPa
k-factor verend scharnier middelste tui:	2455,86 MPa
k-factor verend scharnier binnenste tui:	6975,22 MPa

3. trillingen en comfort

De versnelling van het brugdek kan met 3 methodes worden bepaald: de eindige elementen methode, één-massa-veer systeem en de respons spectra methode. In dit onderzoek wordt er gebruikt gemaakt van de laatst genoemde. De respons spectra methode is gebaseerd op de reactie van een schok. Bij deze methode worden er een aantal aannames gemaakt:

- De beschouwde trilvorm is de fundamentele trilvorm van het systeem;
- De stapfrequentie is gelijk aan de eigenfrequentie van de brug;
- De massa van de brug is gelijkmatig verdeeld;
- De trilvormen zijn sinusvormig;
- De eigentrilvormen hebben geen koppeling met elkaar;
- Het systeem gedraagt zich lineair-elastisch.

De versnelling van het brugdek wordt getoetst aan de comforteis die aangeeft wat de maximale versnelling mag zijn. Dit wordt a_{limit} genoemd. De optredende versnelling wordt a_{max} genoemd.

De optredende versnelling kan berekend worden met:

$$a_{\text{max}} = k_{a,d} * \sigma_a \quad [\text{BIII.1}]$$

$$a_d = \Psi * a_{\text{max}} \quad [\text{BIII.2}]$$

Waarin:

$k_{a,d} = k_{a,95\%} = \text{piekwaarde}$

$\sigma_a = \text{variantie van de versnelling van het brugdek}$

De variantie van de versnelling van het brugdek wordt berekend met vergelijking BIII.3 Deze formule is gebaseerd op een groot aantal experimenten waarbij verschillende brugdekken en verkeersintensiteiten zijn gebruikt.

$$\sigma_a^2 = k_1 \xi^{k_2} \frac{C * \sigma_F^2}{m^* i^2} \quad [\text{BIII.3}]$$

Waarin:

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

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

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3 = \text{constanten}$

$f_i = \text{de beschouwde eigenfrequentie}$

$\xi = \text{dempingsverhouding}$

$C = \text{Constante die het maximum omschrijft van het belastingspectrum}$

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

$\sigma_F = \text{variantie van belastingen}$

$k_F = \text{constante}$

$n = \text{aantal voetgangers op de brug (lengte * breedte * } \frac{\text{personen}}{\text{m}^2} \text{)}$

$m^* = \text{modale massa [kg]}$

$\Psi = \text{reductiecoëfficiënt}$

De constanten in de formules worden bepaald met tabel 4-10 en 4-11 Uit de EUR 23984 EN.

De modale massa kan worden gezien als de geactiveerde massa in een bepaalde trilvorm. Deze kan worden bepaald met vergelijking BIII.4.

$$m^* = \int_0^L \mu(\varphi(x))^2 dx \quad [\text{BIII.4}]$$

Waarin:

L = lengte van de overspanning [m]

μ = Permanente massa per strekkende meter [kg/m]

$\varphi(x)$ = Eigentrilvorm als functie van de lengte van het brugdek [x]

De eigentrilvorm van een scharnierend systeem kan worden bepaald met vergelijking BIII.5.

$$\varphi(x)_n = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad [\text{BIII.5}]$$

Waarin:

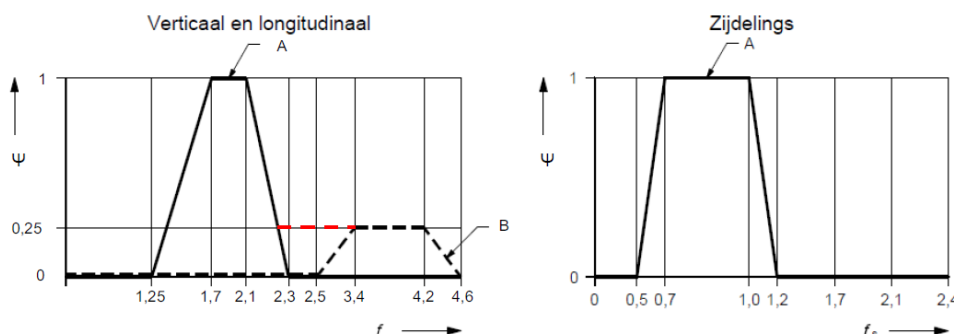
n = integer ($n = 1, 2, 3, \text{etc.}$) [–]

x = plaatsafhankelijke coördinaat [m]

Uit vergelijking BIII.4 en BIII.5 volgt dat de vergelijking van de modale massa voor een scharnierend systeem na generaliseren gelijk is aan:

$$m^* = 0,5\mu L \quad [\text{BIII.6}]$$

De reductiecoëfficiënt is gebaseerd op de gevoeligheid voor resonantie van het brugdek. Deze kan worden afgelezen met figuur BIII.6.



Figuur BIII.6

4. Toetsing op trillingen en comfort

In de EUR 23984 EN moet worden gekozen wat het verwachte aantal personen is per tijdseenheid. Er wordt gekeken naar 3 situaties:

1. De situatie dat de brug vol met mensen staat. Dit zal slechts een aantal keer in de levensduur van de brug voorkomen
2. De situatie dat er een groep mensen/kinderen over de brug gaan. De brug ligt naast een basisschool en daarom wordt de kans geschat dat deze situatie wekelijks voor kan komen.
3. De situatie dat er 15 personen op de brug lopen. Dit zal dagelijks voorkomen.

De dempingsverhouding is materiaalafhankelijk. De CUR 96 geeft aan dat de gemiddelde dempingsverhouding voor een VVK constructie 1% is. Deze waarde is puur voor het materiaal zelf, maar bij de damping speelt alles mee wat aan of in de brug zit. Een stalen leuning of zelf een klein boutje verhogen de dempingsverhouding. De werkelijke dempingsverhouding voor een VVK constructie ligt dus in werkelijkheid hoger. In dit onderzoek wordt er een waarde van 2% aangehouden. Dit is een veilige waarde als er rekening wordt gehouden met de complexiteit van een tuibrug en het ontwerp er van.

Variant 1

Eigenfrequentie

De volgende waarden zijn uit het Matrixmodel van de sandwichconstructie gekomen. Eigenvorm 4 wordt als de fundamentele trilvorm beschouwd.

Tabel BIII.4

Eigenvorm	Eigenwaarde	Natuurlijke rotatiefrequentie	Natuurlijke frequentie	Periode
1	0.097680	10.238	1.629	0.614
2	0.096878	10.322	1.643	0.609
3	0.079767	12.536	1.995	0.501
4	0.075392	13.264	2.107	0.474
5	0.063521	15.743	2.506	0.399
6	0.038434	26.019	4.141	0.241
7	0.035989	27.786	4.200	0.226
8	0.029873	33.475	5.328	0.188
9	0.023422	42.694	6.795	0.147
10	0.019577	51.081	8.130	0.123

Met een eigenfrequentie van 2,107 moet een reductiecoëfficiënt (ψ) van 1 aangehouden worden.

Situatie 1

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $2,5 \text{ m/s}^2$

$$d = 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 321 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 973,5 * 107 = 52,08 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 7 * 10^{-3} * 321 = 2,25$$

$$k_1 = -0,07 * 2,107^2 + 0,56 * 2,107 + 0,084 = 0,95$$

$$k_2 = 0,004 * 2,107^2 - 0,045 * 2,107 - 1 = -1,1$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{0,95 * 0,01^{-1,08} * \frac{3,7 * 2,25^2}{52,08^2}} = 0,47$$

$$a_{\max,d} = 3,80 * 0,47 = \mathbf{1,73 \text{ m/s}^2} < \mathbf{2,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 2

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $1,0 \text{ m/s}^2$

$$d = 0,2 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 64,2 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 973,5 * 107 = 52,08 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 64,2 = 0,77$$

$$k_1 = -0,07 * 2,107^2 + 0,6 * 2,107 + 0,075 = 1,02$$

$$k_2 = 0,003 * 2,107^2 - 0,04 * 2,107 - 1 = -1,07$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,02 * 0,01^{-1,07} * \frac{2,95 * 0,77^2}{52,08^2}} = 0,24$$

$$a_{\max,d} = 3,92 * 0,24 = \mathbf{0,93 \text{ m/s}^2} < \mathbf{1,0 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 3

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $0,5 \text{ m/s}^2$

$$n = 15 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 973,5 * 107 = 52,08 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 15 = 0,18$$

$$k_1 = -0,07 * 2,107^2 + 0,6 * 2,107 + 0,075 = 1,02$$

$$k_2 = 0,003 * 2,107^2 - 0,04 * 2,107 - 1 = -1,07$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,02 * 0,01^{-1,07} * \frac{2,95 * 0,18^2}{52,08^2}} = 0,12$$

$$a_{\max,d} = 3,92 * 0,12 = \mathbf{0,45 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet niet!}$$

Variant 2

De sandwichconstructie kan niet gemakkelijk voldoen op trilling en comfort. Als je de sandwichconstructie wil laten voldoen dan heb je onrealistische dimensies nodig. Om de trilling en comfort te garanderen wordt de trogconstructie ontworpen op een eigenfrequentie van 2,3 Hz. Deze waarde valt net voorbij de piek in figuur BIII.6.

Eigenfrequentie

De volgende waarden zijn uit het Matrixmodel van de trogconstructie gekomen. Eigenvorm 5 wordt als de fundamentele trilvorm beschouwd.

Tabel BIII.5

Eigenvorm	Eigenwaarde	Natuurlijke rotatiefrequentie	Natuurlijke frequentie	Periode
1	0.068427	14.614	2.326	0.430
2	0.068011	14.703	2.340	0.427
3	0.046370	21.566	3.432	0.291
4	0.042380	23.596	3.755	0.266
5	0.037388	26.746	4.257	0.235
6	0.023038	43.407	6.908	0.145
7	0.018457	54.181	8.623	0.116
8	0.015068	66.366	10.562	0.095
9	0.011604	86.178	13.716	0.073
10	0.009178	108.958	17.341	0.058

Met een eigenfrequentie van 4,257 moet een reductiecoëfficiënt (Ψ) van 0,25 aangehouden worden.

Situatie 1

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op 2,5 m/s²

$$d = 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 321 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 683,73 * 107 = 36,58 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 7 * 10^{-3} * 321 = 2,25$$

$$k_1 = -0,07 * 2,107^2 + 0,56 * 2,107 + 0,084 = 1,20$$

$$k_2 = 0,004 * 2,107^2 - 0,045 * 2,107 - 1 = -1,17$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{0,95 * 0,01^{-1,08} * \frac{3,7 * 2,25^2}{36,58^2}} = 0,84$$

$$a_{\text{max}} = 3,73 * 0,84 = 3,15 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 3,15 = 0,79 \text{ m/s}^2 < 2,5 \text{ m/s}^2 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Situatie 2

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $1,0 \text{ m/s}^2$

$$d = 0,2 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 64,2 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 683,73 * 107 = 36,58 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 64,2 = 0,77$$

$$k_1 = -0,07 * 2,107^2 + 0,6 * 2,107 + 0,075 = 1,36$$

$$k_2 = 0,003 * 2,107^2 - 0,04 * 2,107 - 1 = -1,12$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,02 * 0,01^{-1,07} * \frac{2,95 * 0,77^2}{36,58^2}} = 0,43$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,43 = 1,67 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 1,67 = \mathbf{0,42 \text{ m/s}^2} < \mathbf{1,0 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 3

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $0,5 \text{ m/s}^2$

$$n = 15 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 683,73 * 107 = 36,58 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 15 = 0,18$$

$$k_1 = -0,07 * 2,107^2 + 0,6 * 2,107 + 0,075 = 1,36$$

$$k_2 = 0,003 * 2,107^2 - 0,04 * 2,107 - 1 = -1,12$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,02 * 0,01^{-1,07} * \frac{2,95 * 0,18^2}{36,58^2}} = 0,21$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,21 = 0,81 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 0,81 = \mathbf{0,20 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Variant 3

Eigenfrequentie

De volgende waarden zijn uit het Matrixmodel van de trogconstructie gekomen. Eigenvorm 3 wordt als de fundamentele trilvorm beschouwd.

Tabel BIII.6

Eigenvorm	Eigenwaarde	Natuurlijke rotatiefrequentie	Natuurlijke frequentie	Periode
1	0.062302	16.051	2.555	0.391
2	0.059903	16.694	2.657	0.376
3	0.041767	23.943	3.811	0.262
4	0.028766	34.763	5.533	0.181
5	0.020956	47.719	7.595	0.132
6	0.014370	69.590	11.076	0.090
7	0.010607	94.279	15.005	0.067
8	0.008566	116.735	18.579	0.054
9	0.006594	151.660	24.137	0.041
10	0.005120	195.299	31.083	0.032

Met een eigenfrequentie van 3,811 Hz moet een reductiecoëfficiënt (Ψ) van 0,25 aangehouden worden.

Situatie 1

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $2,5 \text{ m/s}^2$

$$d = 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 321 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 753,72 * 107 = 40,32 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 7 * 10^{-3} * 321 = 2,25$$

$$k_1 = -0,07 * 3,811^2 + 0,56 * 3,811 + 0,084 = 1,20$$

$$k_2 = 0,004 * 3,811^2 - 0,045 * 3,811 - 1 = -1,16$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,20 * 0,01^{-1,11} * \frac{3,7 * 2,25^2}{40,32^2}} = 0,75$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,80 * 0,69 = 2,80 \text{ m/s}^2$$

$$a_{\text{max,d}} = 0,25 * 2,80 = \mathbf{0,70 \text{ m/s}^2} < \mathbf{2,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 2

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $1,0 \text{ m/s}^2$

$$d = 0,2 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 64,2 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 753,72 * 107 = 40,32 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 64,2 = 0,77$$

$$k_1 = -0,07 * 3,811^2 + 0,6 * 3,811 + 0,075 = 1,34$$

$$k_2 = 0,003 * 3,811^2 - 0,04 * 3,811 - 1 = -1,11$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,34 * 0,01^{-1,11} * \frac{2,95 * 0,77^2}{40,32^2}} = 0,38$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,38 = 1,49 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 1,49 = \mathbf{0,37 \text{ m/s}^2} < \mathbf{1,0 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 3

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $0,5 \text{ m/s}^2$

$$n = 15 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 753,72 * 107 = 40,32 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 15 = 0,18$$

$$k_1 = -0,07 * 3,811^2 + 0,6 * 3,811 + 0,075 = 1,34$$

$$k_2 = 0,003 * 3,811^2 - 0,04 * 3,811 - 1 = -1,11$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,34 * 0,01^{-1,11} * \frac{2,95 * 0,18^2}{40,32^2}} = 0,18$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,18 = 0,72 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 0,72 = \mathbf{0,18 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Variant 4

Eigenfrequentie

De volgende waarden zijn uit het Matrixmodel van de trogconstructie gekomen. Eigenvorm 4 wordt als de fundamentele trilvorm beschouwd.

Tabel BIII.7

Eigenvorm	Eigenwaarde	Natuurlijke rotatiefrequentie	Natuurlijke frequentie	Periode
1	0.069110	14.470	2.303	0.434
2	0.067665	14.779	2.352	0.425
3	0.047524	21.042	3.349	0.299
4	0.038798	25.774	4.102	0.244
5	0.031621	31.625	5.033	0.199
6	0.020607	48.526	7.723	0.129
7	0.015812	63.245	10.066	0.099
8	0.012839	77.889	12.396	0.081
9	0.009884	101.173	16.102	0.062
10	0.007741	129.177	20.559	0.049

Met een eigenfrequentie van 4,102 Hz moet een reductiecoëfficiënt (Ψ) van 0,25 aangehouden worden.

Situatie 1

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op 2,5 m/s²

$$d = 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 321 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 790,5 * 107 = 42,29 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 7 * 10^{-3} * 321 = 2,25$$

$$k_1 = -0,07 * 4,102^2 + 0,56 * 4,102 + 0,084 = 1,20$$

$$k_2 = 0,004 * 4,102^2 - 0,045 * 4,102 - 1 = -1,16$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,20 * 0,01^{-1,12} * \frac{3,7 * 2,25^2}{42,29^2}} = 0,73$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,80 * 0,73 = 2,71 \text{ m/s}^2$$

$$a_{\text{max,d}} = 0,25 * 2,71 = 0,68 \text{ m/s}^2 < 2,5 \text{ m/s}^2 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Situatie 2

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $1,0 \text{ m/s}^2$

$$d = 0,2 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 64,2 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 790,5 * 107 = 42,29 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 64,2 = 0,77$$

$$k_1 = -0,07 * 4,102^2 + 0,6 * 4,102 + 0,075 = 1,36$$

$$k_2 = 0,003 * 4,102^2 - 0,04 * 4,102 - 1 = -1,11$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,36 * 0,01^{-1,11} * \frac{2,95 * 0,77^2}{42,29^2}} = 0,37$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,37 = 1,44 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 1,44 = \mathbf{0,36 \text{ m/s}^2} < \mathbf{1,0 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 3

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $0,5 \text{ m/s}^2$

$$n = 15 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 790,5 * 107 = 42,29 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 15 = 0,18$$

$$k_1 = -0,07 * 4,102^2 + 0,6 * 4,102 + 0,075 = 1,36$$

$$k_2 = 0,003 * 4,102^2 - 0,04 * 4,102 - 1 = -1,11$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,36 * 0,01^{-1,11} * \frac{2,95 * 0,18^2}{42,29^2}} = 0,18$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,18 = 0,70 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 0,70 = \mathbf{0,17 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Variant 5

Eigenfrequentie

De volgende waarden zijn uit het Matrixmodel van de trogconstructie gekomen. Eigenvorm 3 wordt als de fundamentele trilvorm beschouwd.

Tabel BIII.8

Eigenvorm	Eigenwaarde	Natuurlijke rotatiefrequentie	Natuurlijke frequentie	Periode
1	0.065477	15.273	2.431	0.411
2	0.062901	15.898	2.530	0.395
3	0.043976	22.740	3.619	0.276
4	0.030745	32.526	5.177	0.193
5	0.022614	44.220	7.038	0.142
6	0.015454	64.707	10.298	0.097
7	0.011437	87.432	13.915	0.072
8	0.009240	108.225	17.225	0.058
9	0.007112	140.612	22.379	0.045
10	0.005526	180.965	28.801	0.035

Met een eigenfrequentie van 3,619 Hz moet een reductiecoëfficiënt (Ψ) van 0,25 aangehouden worden.

Situatie 1

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $2,5 \text{ m/s}^2$

$$d = 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 321 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 822,23 * 107 = 43,99 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 7 * 10^{-3} * 321 = 2,25$$

$$k_1 = -0,07 * 3,619^2 + 0,56 * 3,619 + 0,084 = 1,19$$

$$k_2 = 0,004 * 3,619^2 - 0,045 * 3,619 - 1 = -1,15$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,19 * 0,01^{-1,11} * \frac{3,7 * 2,25^2}{42,29^2}} = 0,68$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,80 * 0,68 = 2,53 \text{ m/s}^2$$

$$a_{\text{max,d}} = 0,25 * 2,39 = 0,63 \text{ m/s}^2 < 2,5 \text{ m/s}^2 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Situatie 2

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $1,0 \text{ m/s}^2$

$$d = 0,2 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 64,2 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 822,23 * 107 = 43,99 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 64,2 = 0,77$$

$$k_1 = -0,07 * 3,619^2 + 0,6 * 3,619 + 0,075 = 1,33$$

$$k_2 = 0,003 * 3,619^2 - 0,04 * 3,619 - 1 = -1,11$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,33 * 0,01^{-1,11} * \frac{2,95 * 0,77^2}{42,29^2}} = 0,34$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,34 = 1,35 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 1,35 = \mathbf{0,34 \text{ m/s}^2} < \mathbf{1,0 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 3

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $0,5 \text{ m/s}^2$

$$n = 15 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 822,23 * 107 = 43,99 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 15 = 0,18$$

$$k_1 = -0,07 * 3,619^2 + 0,6 * 3,619 + 0,075 = 1,33$$

$$k_2 = 0,003 * 3,619^2 - 0,04 * 3,619 - 1 = -1,11$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,33 * 0,01^{-1,11} * \frac{2,95 * 0,18^2}{42,29^2}} = 0,17$$

$$a_{\text{max,d}} = 3,92 * 0,17 = 0,65 \text{ m/s}^2$$

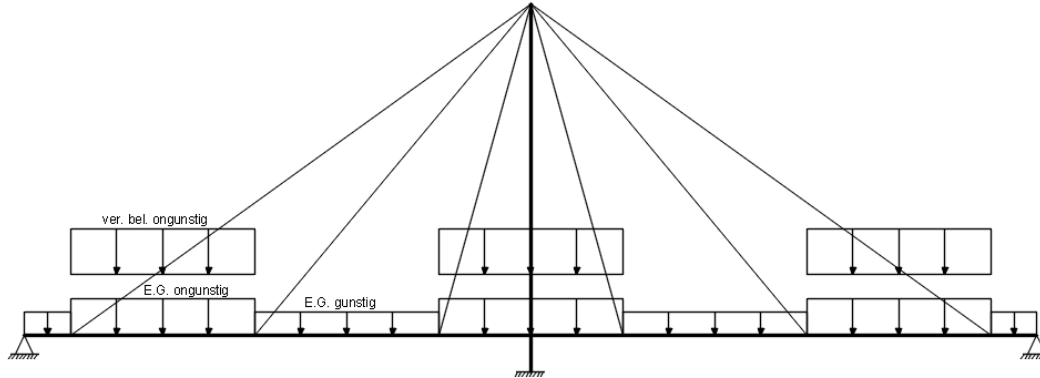
$$a_d = 0,25 * 0,65 = \mathbf{0,16 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Toetsing op sterkte

Variant 1

Trekspanning in de huiden tgv buigend moment

Maatgevende belastingcombinatie



Maximaal moment t.p.v. veld: 1793,02 kNm

Maximaal moment t.p.v. tuiaansluiting: 1490,52 kNm

Opneembare spanning

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{1,t,huid}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{558}{1,62 * 1,21} = 285 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$I = 1241627 * 10^4$$

$$W_o = \frac{I}{e_o} = \frac{1241627 * 10^4}{370} = 33549 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_b = \frac{I}{e_b} = \frac{1241627 * 10^4}{600 - 370} = 54005 * 10^3 \text{ mm}^3$$

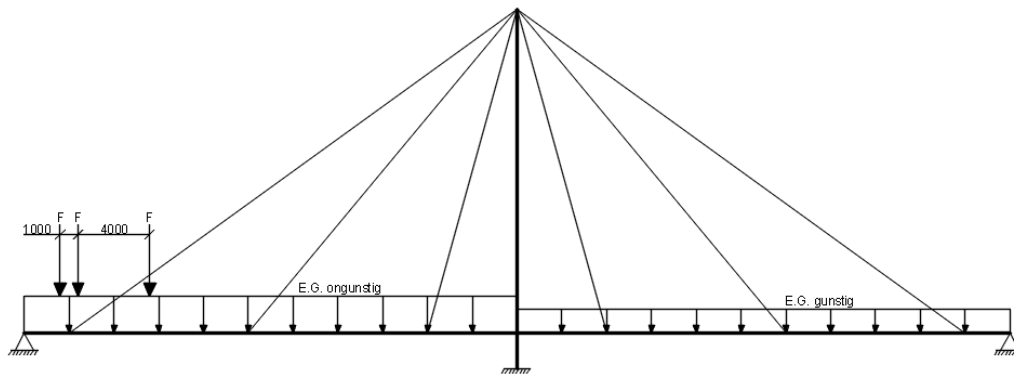
$$\sigma_{max} = \frac{M_{veld}}{W_o} = \frac{1793,02 * 10^6}{33549 * 10^3} = 53 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Rd}} = \frac{53}{285} = 0,19 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Dwarskracht in de lijven

Maatgevende belastingcombinatie



Maximale dwarskracht op een lijfplaat: 51,92 kN

Opneembare spanning

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{12,lijf}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{64}{1,62 * 1,21} = 32,65 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$\tau_{lijf,max} = \frac{V_{max}}{A_{lijf}} * \frac{3}{2} = \frac{51,92 * 10^3}{350 * 7,56} * \frac{3}{2} = 29,43 \text{ MPa}$$

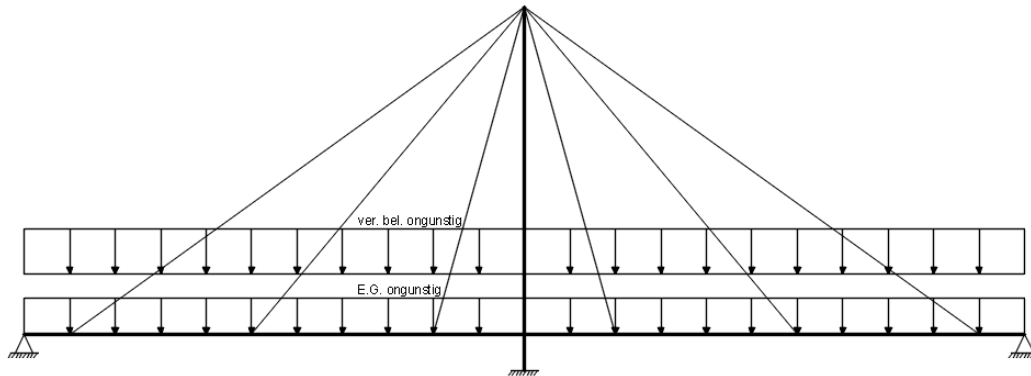
Unity check

$$\frac{\tau_{lijf,max}}{\tau_{Rd}} = \frac{30,84}{32,65} = 0,90 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Variant 2

Trekspanning in de huid tgv buigend moment

Maatgevende belastingcombinatie



Maximaal moment t.p.v. veld: 1891,37 kNm

Maximaal moment t.p.v. tuiaansluiting: 1578,12 kNm

Opneembare spanning

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{1,t,huid}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{558}{1,62 * 1,21} = 285 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$I = 4280813 * 10^4$$

$$W_o = \frac{I}{e_o} = \frac{4280813 * 10^4}{233} = 152603 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_b = \frac{I}{e_b} = \frac{4280813 * 10^4}{1450 - 233} = 35130 * 10^3 \text{ mm}^3$$

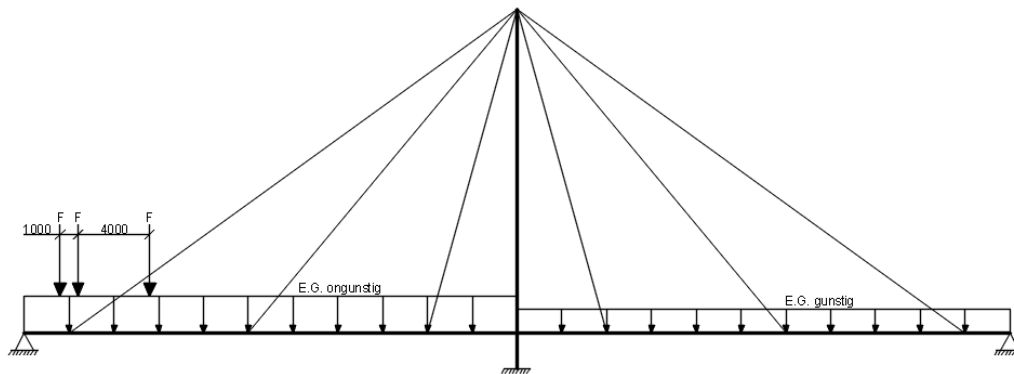
$$\sigma_{max} = \frac{M_{steunpunt}}{W_b} = \frac{1578,12 * 10^6}{35130 * 10^3} = 45 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Rd}} = \frac{45}{285} = 0,16 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Dwarskracht in de lijven

Maatgevende belastingcombinatie



F = wagen klasse 30

Maximale dwarskracht op een lijfplaat: 50,42 kN

Opneembare spanning

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{12,lijf}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{64}{1,62 * 1,21} = 32,65 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$\tau_{lijf,max} = \frac{V_{max}}{A_{lijf}} * \frac{3}{2} = \frac{50,42 * 10^3}{350 * 7,56} * \frac{3}{2} = 28,57 \text{ MPa}$$

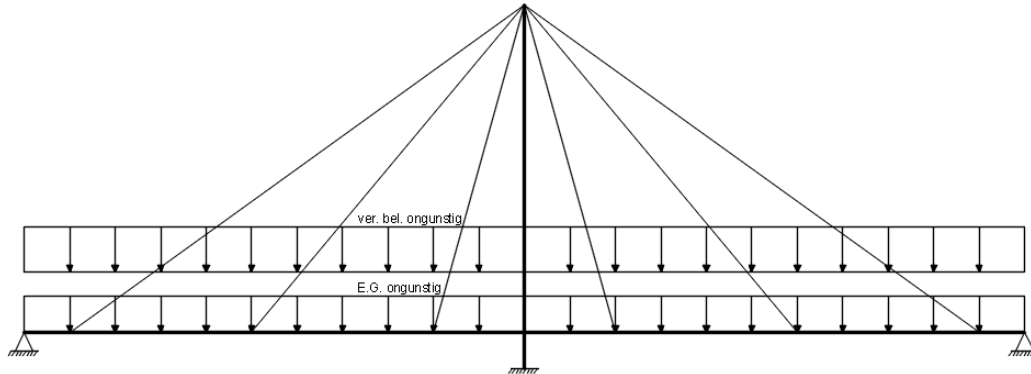
Unity check

$$\frac{\tau_{lijf,max}}{\tau_{Rd}} = \frac{28,57}{32,65} = 0,88 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Variant 3

Trekspanning in de huden tgv buigend moment

Maatgevende belastingcombinatie



Maximaal moment t.p.v. veld: 2239,67 kNm

Maximaal moment t.p.v. tuiaansluiting: 2930,84 kNm

Opneembare spanning

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{1,t,huid}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{558}{1,62 * 1,21} = 285 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$I = 14810068 * 10^4$$

$$W_o = \frac{I}{e_o} = \frac{14810068 * 10^4}{571} = 259183 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_b = \frac{I}{e_b} = \frac{9163967 * 10^4}{1450 - 571} = 168567 * 10^3 \text{ mm}^3$$

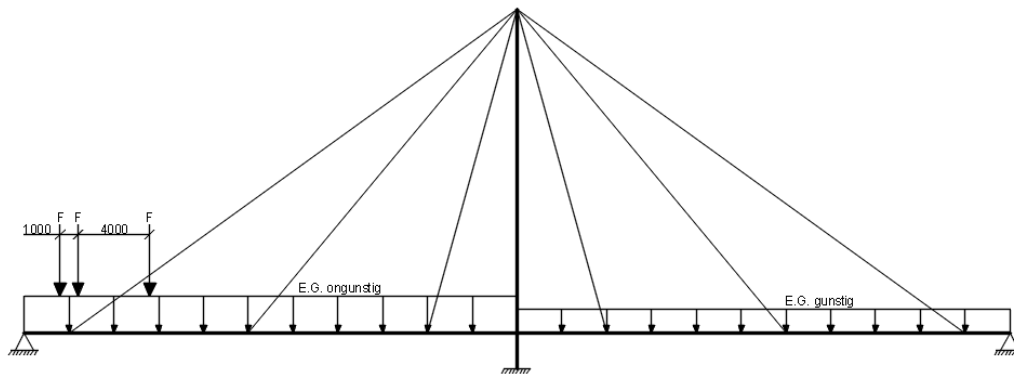
$$\sigma_{max} = \frac{M_{steunpunt}}{W_b} = \frac{2239,67 * 10^6}{168567 * 10^3} = 13 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Rd}} = \frac{13}{285} = 0,05 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Dwarskracht in de lijven

Maatgevende belastingcombinatie



F = wagen klasse 30

Maximale dwarskracht op een lijfplaat: 54,70 kN

Opneembare spanning

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{12,lijf}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{64}{1,62 * 1,21} = 32,65 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$\tau_{lijf,max} = \frac{V_{max}}{A_{lijf}} * \frac{3}{2} = \frac{54,70 * 10^3}{350 * 7,56} * \frac{3}{2} = 31 \text{ MPa}$$

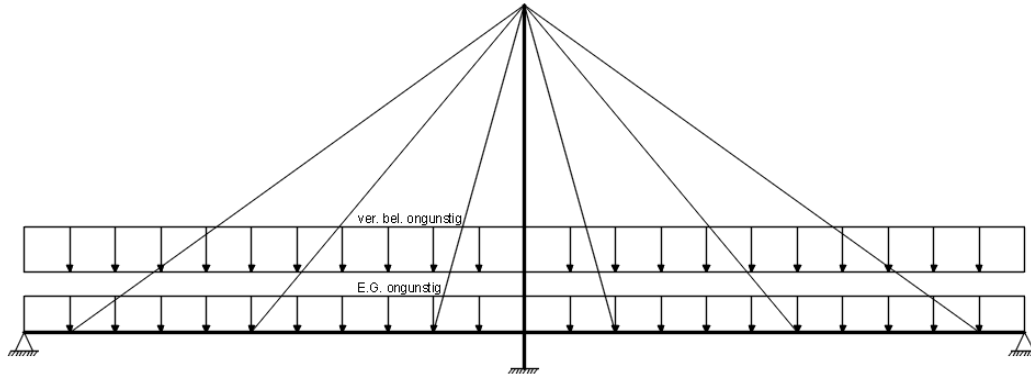
Unity check

$$\frac{\tau_{lijf,max}}{\tau_{Rd}} = \frac{31}{32,65} = 0,95 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Variant 4

Trekspanning in de huden tgv buigend moment

Maatgevende belastingcombinatie



Maximaal moment t.p.v. veld: 2207,46 kNm

Maximaal moment t.p.v. tuiaansluiting: 1842,09 kNm

Opneembare spanning

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{1,t,huid}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{558}{1,62 * 1,21} = 285 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$I = 6679429 * 10^4$$

$$W_o = \frac{I}{e_o} = \frac{6679429 * 10^4}{344} = 194000 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_b = \frac{I}{e_b} = \frac{6679429 * 10^4}{1450 - 344} = 60409 * 10^3 \text{ mm}^3$$

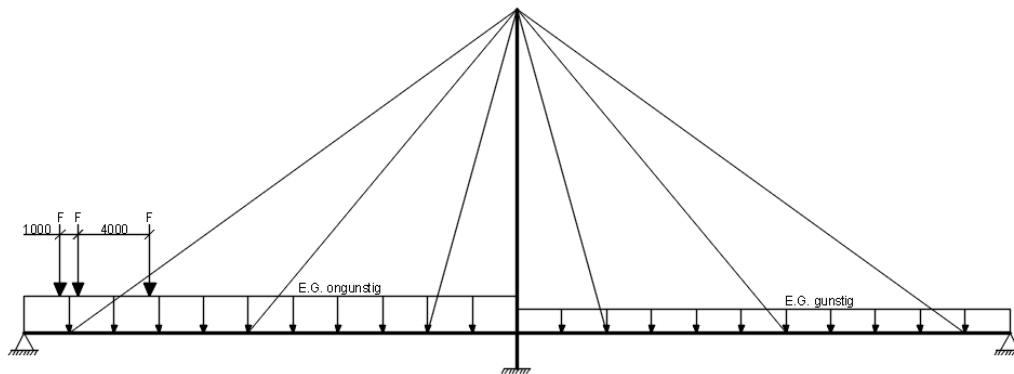
$$\sigma_{max} = \frac{M_{steunpunt}}{W_b} = \frac{1842,09 * 10^6}{60409 * 10^3} = 30 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Rd}} = \frac{30}{285} = 0,11 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Dwarskracht in de lijven

Maatgevende belastingcombinatie



F = wagen klasse 30

Maximale dwarskracht op een lijfplaat: 54,36 kN

Opneembare spanning

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{12,lijf}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{64}{1,62 * 1,21} = 32,65 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$\tau_{lijf,max} = \frac{V_{max}}{A_{lijf}} * \frac{3}{2} = \frac{54,36 * 10^3}{350 * 7,56} * \frac{3}{2} = 30,82 \text{ MPa}$$

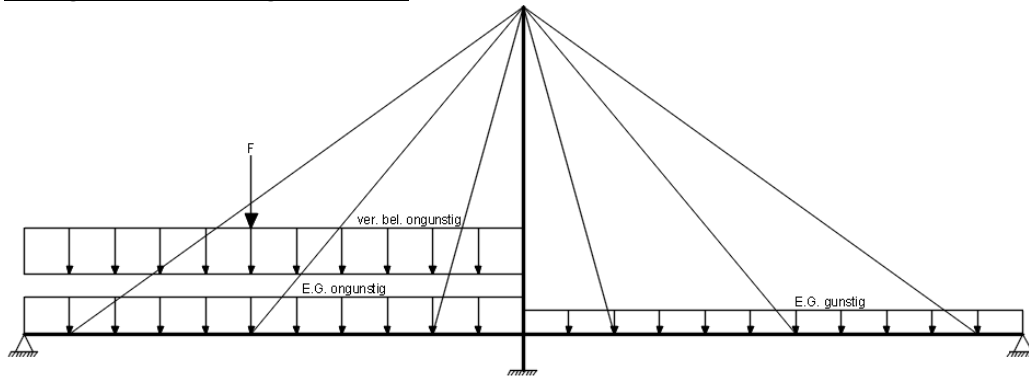
Unity check

$$\frac{\tau_{lijf,max}}{\tau_{Rd}} = \frac{30,82}{32,65} = 0,94 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Variant 5

Trekspanning in de huden tgv buigend moment

Maatgevende belastingcombinatie



F = strooiwagen

Maximaal moment t.p.v. veld: 3347,89 kNm

Maximaal moment t.p.v. tuiaansluiting: 2434,72 kNm

Opneembare spanning

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{1,t,huid}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{558}{1,62 * 1,21} = 285 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$I = 13869245 * 10^4$$

$$W_o = \frac{I}{e_o} = \frac{13869245 * 10^4}{646} = 214643 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_b = \frac{I}{e_b} = \frac{9163967 * 10^4}{1450 - 646} = 172536 * 10^3 \text{ mm}^3$$

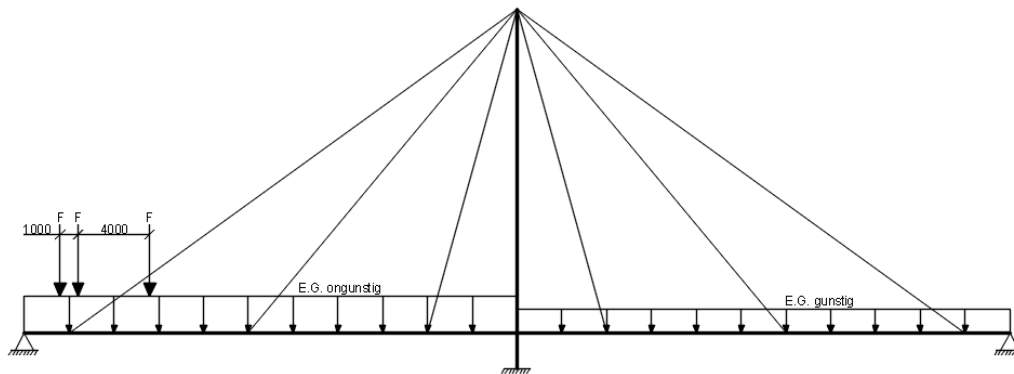
$$\sigma_{max} = \frac{M_{veld}}{W_o} = \frac{3347,89 * 10^6}{214643 * 10^3} = 16 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Rd}} = \frac{16}{285} = 0,05 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Dwarskracht in de lijven

Maatgevende belastingcombinatie



F = wagen klasse 30

Maximale dwarskracht op een lijfplaat: 54,56 kN

Opneembare spanning

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{12,lijf}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{64}{1,62 * 1,21} = 32,65 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$\tau_{lijf,max} = \frac{V_{max}}{A_{lijf}} * \frac{3}{2} = \frac{54,56 * 10^3}{350 * 7,56} * \frac{3}{2} = 30,93 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\tau_{lijf,max}}{\tau_{Rd}} = \frac{31}{32,65} = 0,95 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Kosten

De kosten van de productie een VVK sandwichdek liggen op ongeveer €1000/m². Wanneer de leuning in het dek geïntegreerd wil worden zal dit ongeveer €2500/m² gaan kosten. Deze prijs is gebaseerd op een VVK brug met geïntegreerde leuning van FiberCore met een lengte van 27 meter en 1,5 meter breed. Momenteel kan FiberCore niet breder dan 1,5 meter een brug met geïntegreerde leuning maken. Dit maakt het goedkoper om het sandwichpaneel apart te maken en de leuning er zodanig op te monteren de het wel constructief meewerkt. De leuning zal dan bestaan uit pultrusie profielen welke door het bedrijf Bijlprofielen op maat gemaakt kunnen worden. De prijs voor pultrusie profielen ligt dicht in de buurt van staal.

	Onderdeel	Oppervlakte [m ²]	Soort. Gew. [kg/m ³]	prijs/kg	productiekosten	totale kosten
variant 1	VVK dek	0,271	1912	€ 5	€ 320.000	€ 600.000
	Stalen leuning	0,028	7850	€ 4	€ 35.000	€ 70.000
	Trillingdempers	-	-	-	-	€ 80.000
						€ 750.000
variant 2	VVK dek + leuning	0,198	1912	€ 5	€ 800.000	€ 1.000.000
						€ 1.000.000
variant 3	VVK dek	0,185	1912	€ 5	€ 550.000	€ 750.000
	Stalen leuning	0,032	7850	€ 4	€ 50.000	€ 150.000
						€ 900.000
variant 4	VVK dek	0,185	1912	€ 5	€ 320.000	€ 500.000
	VVK leuning	0,053	1912	€ 5	€ 50.000	€ 110.000
						€ 610.000
variant 5	VVK dek	0,185	1912	€ 5	€ 321.000	€ 500.000
	Stalen leuning	0,019	7850	€ 4	€ 30.000	€ 80.000
						€ 580.000
Origineel	Staal	0,049	7850	€ 4	€ 165.000	€ 330.000

Conclusie

Een VVK leuning integreren met een VVK dek geeft een hoog traagheidsmoment en heeft weinig onderhoud nodig. Het grote nadeel is dat de productiekosten en mogelijkheid tot productie het tegenhoudt. Een VVK leuning achteraf op het brugdek monteren is momenteel de meest haalbare optie. Er kan dan gekozen worden voor twee mogelijkheden: de leuning wel of niet constructief laten meewerken. De leuning wel constructief laten meewerken blijkt de beste optie. Door de lage stijfheid van de andere variant moeten er extra maatregelen worden getroffen om de gevolgen van de lage stijfheid op te vangen.

Hogeschool Rotterdam / Gemeente Rotterdam

VVK brug grote overspanning

Bijlage IV – Berekening pyloon

Naam:	Lennart Kraaijenbrink
Studentnummer:	0884858
Versie:	1.0 (definitief)
Datum:	dinsdag 13 juni 2017

Inhoud

Inleiding	2
Toelichting berekening	2
1. Uitgangspunten	3
Normen & voorschriften	3
Materialen	3
Ontwerpcriteria	3
Belasting-, conversie & materiaalfactoren	3
Belastingcombinaties	4
Belastingen	4
Gebruikte software	4
2. Reductiefactor plooï en plaatimperfecties	5
Mast	5
Schoren	6
3. Mast van de pyloon (ø850-50)	8
Stabiliteitscontrole	9
Knikkromme	9
kipkromme	10
Unity check	10
Sterktecontrole	11
Unity check	11
4. Schoren van de pyloon (ø530-30)	12
Stabiliteitscontrole	12
Knikkromme	13
Unity check	14
Sterktecontrole	14
Unity check	14
5. Kosten	15
6. Conclusie	16

Inleiding

Er bestaan al talloze bruggen in hout, beton en staal. Tegenwoordig hebben bruggen van vezelversterkt kunststof (VVK) bewezen dat ze goed toe te passen zijn op korte overspanningen. Deze overspanningen gaan tot ongeveer 30 meter. Om het als serieuze concurrentie te zien van de conventionele materialen zal VVK zich ook moeten bewijzen op grotere overspanningen.

In dit onderzoek wordt er een VVK brug met een overspanning van 100 meter beschouwd. Wanneer er glasvezels worden toegepast in het composiet is een vrije overspanning van 30 meter al moeilijk te halen met een VVK brug, laat staan 100 meter. Er wordt daarom onderzocht hoe een VVK brug eruit moet komen te zien in de vorm van een tuibrug. Als referentiebrug wordt de ringvaartplasbrug gebruikt.

Kenmerkend van de ringvaartplasbrug is de schuin staande pyloon. Deze wordt gestabiliseerd door een tui, een trekstang en 2 schoren. In dit document wordt er berekend hoe dik de profielen worden wanneer ze van VVK zijn.

Toelichting berekening

- De berekening is uitgevoerd op dezelfde manier als de originele berekening van de ringvaartplasbrug. Dat wil zeggen dat de oude normen van toepassing zijn. Helaas is de meest recente versie van de berekening niet terug te vinden in het archief van de gemeente Rotterdam. De beschikbare berekening bevat een aantal fouten, welke ook zijn meegenomen in deze berekening. In bijlage V worden de huidige normen gebruikt en zijn de fouten gecorrigeerd.
- In deze berekening worden alleen de buisprofielen van VVK berekend. De trekstaaf en de tui in de pyloon blijven van staal, omdat deze de top van de pyloon nog enigszins stabiel houden. Wanneer de trekstaaf ook van VVK wordt gemaakt gaat de EA van de staaf erg achteruit, wat nadelig is voor de uitbuiging van de top en in dit onderzoek als onacceptabel geacht. Een onrealistische diameter van een eventuele trekstaaf van VVK, om de EA gelijk te houden, wordt ook uitgesloten.
- De toetsing van de VVK profielen op stabiliteit, is ter vergelijking, op dezelfde normen getoetst als de bestaande brug. Hierbij worden dezelfde fouten in de berekening meegenomen.
- De opneembare belastingen van de VVK profielen is berekend conform de nieuwe CUR96, welke overigens op het moment van dit onderzoek nog niet is uitgegeven.
- Maatgevend voor de dikte van de profielen is knik. Knik in VVK constructies wordt op nagenoeg dezelfde manier berekend als in staal, alleen bij VVK constructies wordt er rekening gehouden met plooï en plaatimperfecties. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van een zogenaamde D-matrix, die vereenvoudigd kan worden als het volgende wordt aangenomen: *In het voorontwerp van constructies kan ervoor gekozen worden de invloed van de lamelstapeling op de buigstijfheid van het laminaat te verwaarlozen. Aangenomen wordt dat het laminaat bestaat uit een groot aantal lamellen die over de dikte gelijkmatig verdeeld zijn.*
- Voor de sterkte en stijfheid van de VVK buisprofielen worden dezelfde waardes aangenomen als de huid van de sandwichconstructie van FiberCore.

1. Uitgangspunten

Ten behoeve van de correctheid van de materiaaleigenschappen en factoren worden de waardes aangehouden zoals staat aangegeven in het document van InfraCore 'Dit is InfraCore Inside – Ontwerp en eigenschappen (revisie 010, 25 juli 2014)'. De achtergronden van de materiaaleigenschappen en factoren worden in dit bestand niet behandeld.

Normen & voorschriften

NEN 6702:1991	Belastingen en vervormingen (+ wijzigingen)
NEN 6770:1991	basiseisen (+ wijzigingen)
NEN 6771:1991	stabiliteit (+ wijzigingen)
NEN 6788:1991	VOSB 1990 (ontwerp)
CUR-aanbeveling 96 (2003)	Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies
CUR-aanbeveling 96 (1 ^e herziene uitgave)	Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies

Materialen

Staalkwaliteit:	S355
VVK materiaal:	glasvezel/polyester, 0° (75%)/90° (25%), $\nu_f = 0,52$

Eigenschap	Eenheid	VVK buisprofielen
ρ	kg/m ³	1912
E_1	Mpa	32300
E_2	Mpa	17400
G_{12}	Mpa	5600
$\sigma_{1,t}$	Mpa	558
$\sigma_{2,t}$	Mpa	166
$\sigma_{1,c}$	Mpa	269
$\sigma_{2,c}$	Mpa	149
τ_{12}	Mpa	39

Ontwerpcriteria

Gevolgsklasse:	CC2
Referentieperiode:	100 jaar
Windgebied:	II

Belasting-, conversie & materiaalfactoren

Permanente belasting:	$\gamma_{G,j,sup} = 1,5$ $\gamma_{G,j,inf} = 0,9$
Veranderlijke belasting:	$\gamma_Q = 1,5$
Materiaalfactor BGT:	$\gamma_{BGT} = 1$
Materiaalfactor UGT:	$\gamma_{UGT} = 1,62$

Conversiefactoren:

Conversiefactor		Uiterste grenstoestand			Bruikbaarheidsgrenstoestand		
		STR/GEO (Sterkte) γ_{cs}	EQU (Stabiliteit) γ_{ck}	FAT (Vermoeiing) γ_{cv}	Vervorming γ_{cd}	Trillingen γ_{ct}	Eerste scheurvorming γ_{c1}
Temperatuur	γ_{ct}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Vocht	γ_{cv}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Kruip	γ_{ck}	1,26	1,26		1,26		1,26
Vermoeiing	γ_{cf}		1,1		1,1	1,1	1,1
Kortdurend	γ_{c-k}	1,21	1,33	1,21	1,21	1,21	1,33
Langdurend	γ_{c-1}	1,52	1,68	1,21	1,68	1,33	1,68

Belastingcombinaties

Er worden dezelfde belastingcombinaties gehanteerd als de belastingcombinaties gebruikt in het ontwerp van de ringvaartplasbrug. De maatgevende belastingcombinaties zijn terug te vinden in de berekening.

Belastingen

Er worden dezelfde belastingen gehanteerd als de belastingen gebruikt in het ontwerp van de ringvaartplasbrug.

Gebruikte software

AutoCad 2015

MatrixFrame 5.2.9

2. Reductiefactor plooi en plaatimperfecties

Getoetst moet worden of plooien belangrijke invloed heeft op de stijfheid heeft.

$$\rho = \frac{f_{c,stab,k}}{f_{c,k}} \leq 1,0$$

$$\rho = \frac{f_{b,stab,k}}{f_{c,k}} \leq 1,0$$

waarin:

ρ = reductiefactor voor het lokaal plooien en lokale imperfecties van op druk belaste staven

$f_{c,stab,k}$ = karakteristieke druksterkte rekening houdend met plooi en plaatimperfecties

$f_{b,stab,k}$ = karakteristieke druksterkte rekening houdend met plooi en plaatimperfecties

$f_{c,k}$ = karakteristieke druksterkte van de staaf in de richting van de staafas

$f_{c,stab,k}$ is afhankelijk van de mate van de buigstijfheid van het profiel. Deze kan worden bepaald door middel van een vereenvoudigd D-matrix. De elementen van de D-matrix moeten worden berekend met de rekenwaarden van de materiaalstijfheden ($E_{c,1}$, $E_{c,2}$ en G_{12}).

Mast

Vereenvoudigde D-matrix

$$D_{11} = \frac{E_{c,1} * t^3}{12 * (1 - \nu_{12}\nu_{21})}$$

$$D_{11} = \frac{32300 * 50^3}{12 * (1 - 0,29 * 0,16)}$$

$$D_{11} = 353200600 \text{ MPa}$$

$$D_{22} = \frac{E_{c,2} * t^3}{12 * (1 - \nu_{12}\nu_{21})}$$

$$D_{22} = \frac{17400 * 50^3}{12 * (1 - 0,29 * 0,16)}$$

$$D_{22} = 190269054 \text{ MPa}$$

$$D_{12} = \nu_{12} * D_{22}$$

$$D_{12} = 0,29 * 190269054$$

$$D_{12} = 55408300 \text{ MPa}$$

$$D_{66} = \frac{G_{12} * t^3}{12}$$

$$D_{66} = \frac{5600 * 50^3}{12}$$

$$D_{66} = 58333333 \text{ MPa}$$

$$K = \frac{2D_{66} + D_{12}}{\sqrt{D_{11}D_{11}}}$$

$$K = 0,005$$

Reductiefactor voor knik

$$f_{c,stab,k} = \frac{\pi^2}{t_w * b_w^2} * [2 * \sqrt{D_{11} * D_{22}} + 2 * (D_{12} + 2 * D_{66})]$$

$$f_{c,stab,k} = \frac{\pi^2}{50 * \left(\frac{850}{1,13}\right)^2} * [2 * \sqrt{353200600 * 190269054} + 2 * (55408300 + 2 * 58333333)]$$

$$f_{c,stab,k} = 301 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{301}{269} = 1,12 > 1,0 \rightarrow \mathbf{1,0 \text{ aanhouden}}$$

Reductiefactor voor kip

$$f_{b,stab,k} = \frac{\pi^2}{t_w * b_w^2} * [13,4 * \sqrt{D_{11} * D_{22}} + 10,4 * (D_{12} + 2 * D_{66})]$$

$$f_{b,stab,k} = \frac{\pi^2}{50 * \left(\frac{850}{1,13}\right)^2} * [13,4 * \sqrt{353200600 * 190269054} + 10,4 * (55408300 + 2 * 58333333)]$$

$$f_{b,stab,k} = 1836 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{1836}{269} = 6,83 > 1,0 \rightarrow \mathbf{1,0 \text{ aanhouden}}$$

Schoren

Vereenvoudigde D-matrix

$$D_{11} = \frac{E_{c,1} * t^3}{12 * (1 - \nu_{12} \nu_{21})}$$

$$D_{11} = \frac{32300 * 30^3}{12 * (1 - 0,29 * 0,16)}$$

$$D_{11} = 76291330 \text{ MPa}$$

$$D_{22} = \frac{E_{c,2} * t^3}{12 * (1 - \nu_{12} \nu_{21})}$$

$$D_{22} = \frac{17400 * 30^3}{12 * (1 - 0,29 * 0,16)}$$

$$D_{22} = 41098116 \text{ MPa}$$

$$D_{12} = \nu_{12} * D_{22}$$

$$D_{12} = 0,29 * 41098116$$

$$D_{12} = 11968193 \text{ MPa}$$

$$D_{66} = \frac{G_{12} * t^3}{12}$$

$$D_{66} = \frac{5600 * 30^3}{12}$$

$$D_{66} = 12600000 \text{ MPa}$$

$$K = 0,0001$$

Reductiefactor voor knik

$$f_{c,stab,k} = \frac{\pi^2}{t_w * b_w^2} * [2 * \sqrt{D_{11} * D_{22}} + 2 * (D_{12} + 2 * D_{66})]$$

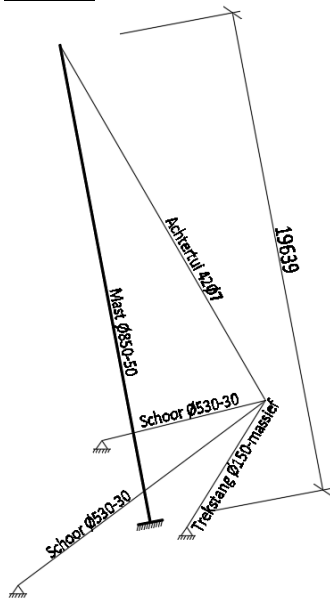
$$f_{c,stab,k} = \frac{\pi^2}{30 * \left(\frac{530}{1,13}\right)^2} * [2 * \sqrt{76291330 * 41098116} + 2 * (11968193 + 2 * 12600000)]$$

$$f_{c,stab,k} = 279 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{279}{269} = 1,04 > 1,0 \rightarrow 1,0 \text{ aanhouden}$$

3. Mast van de pyloon (ø850-50)

Schema



Profiel wordt belast op druk en buiging

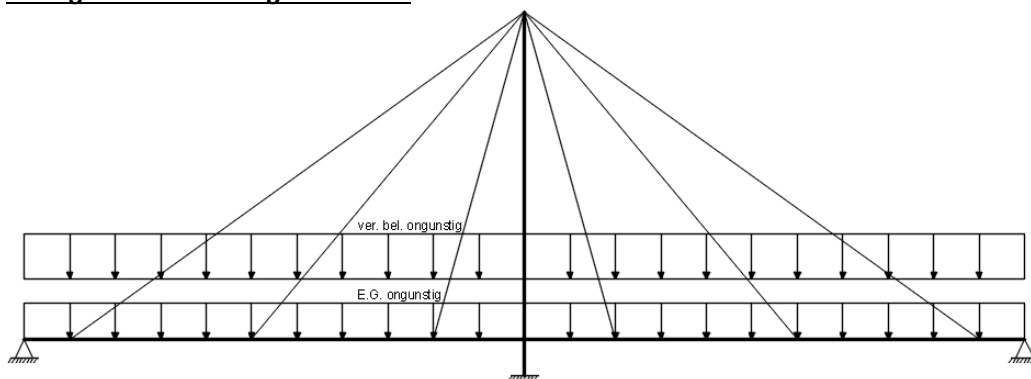
Gegevens buisprofiel ø850-50

$$A = 125664 \text{ mm}^2$$

$$I = 1009237 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

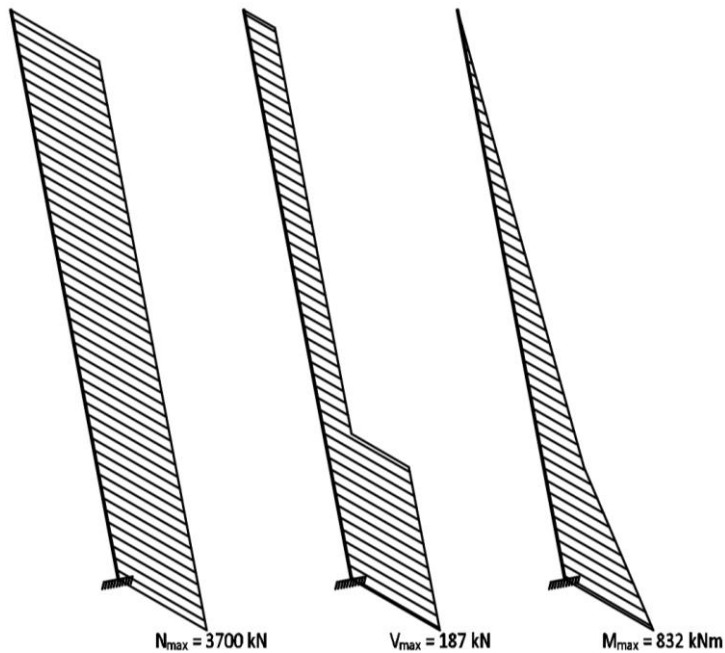
$$W = 23747 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Maatgevende belastingcombinatie



1,5*Eigen gewicht + 1,5*veranderlijke belasting + zettingen pyloon + wind van achter

Krachtenwerking



Stabiliteitscontrole

Het profiel wordt op stabiliteit getoetst op de plek waar die uitbuigt. Dit is ongeveer op de halve hoogte.

Knikkromme

Formule

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Waarin:

χ = reductiefactor voor de knikkvorm

Φ =

$\bar{\lambda}_f$ = relatieve slankheid

Tussenparameters

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A \cdot \rho \cdot f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

Waarin:

A = oppervlakte van het profiel

N_{cr} = kritische elastische kracht

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_{c,1} \cdot I_1}{l_{cr}^2}$$

l_{cr} = kritische kniklengte

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_{c,1} \cdot I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 32300 \cdot 1009237 \cdot 10^4}{\left(\frac{19639}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$N_{cr} = 16808 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{125664 * 1,0 * 269}{16808 * 10^3}} = \mathbf{1,50}$$

$$\Phi = 0,5 * \left[1 + \alpha_f * (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2 \right]$$

Waarin:

$\bar{\lambda}_{f,0}$ = plateaulengte van de knikkromme

α_f = imperfectiefactor

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\alpha_f = 0,4$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,4 * (1,50 - 0,5) + 1,50^2] = \mathbf{1,82}$$

Uitkomst

$$\chi = \frac{1}{1,82 + \sqrt{1,82^2 - 1,50^2}}$$

$$\chi = \mathbf{0,35}$$

kipkromme

Een buisprofiel is niet gevoelig voor kip, dus $\chi_{LT} = 1,0$.

Unity check

Toets

$$1,1 \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + 1,1 \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belastingen

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{125664 * 1,0 * 269,0 * 0,35}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = \mathbf{5473 \text{ kN}}$$

$$M_{b,Rd} = \frac{W * \rho * f_{c,k} * \chi_{LT}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$M_{b,Rd} = \frac{23747 * 10^3 * 1,0 * 269,0 * 1,0}{1,62 * 1,33}$$

$$M_{b,Rd} = \mathbf{2963 \text{ kNm}}$$

Unity check

Controle op halve hoogte

$$1,1 * \frac{3700}{5473} + 1,1 * \frac{416}{2963} = 0,74 + 0,15 = \mathbf{0,9 < 1,0 \rightarrow Voldoet!}$$

Sterktecontrole

Het profiel wordt getoetst op sterkte ter plaatse van de inklemming.

Unity check

toets

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belastingen

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{A * f_{c,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{A * f_{c,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{125664 * 269}{1,62 * 1,21}; \frac{125664 * 301}{1,62 * 1,21} \right\}$$

$$N_{c,Rd} = 17245 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \frac{W * f_{b,c,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{W * f_{b,c,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \frac{23747 * 10^3 * 269}{1,62 * 1,21}; \frac{23747 * 10^3 * 1482}{1,62 * 1,21} \right\}$$

$$M_{y,Rd} = 3259 \text{ kNm}$$

$$V_{z,Rd} = \min \left\{ \frac{A_v * \tau_{12,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{A_v * \tau_{12,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$V_{z,Rd} = \min \left\{ \frac{125664 * 39}{1,62 * 1,21}; \frac{125664 * 630}{1,62 * 1,21} \right\}$$

$$V_{z,Rd} = 2500 \text{ kN}$$

Unity check

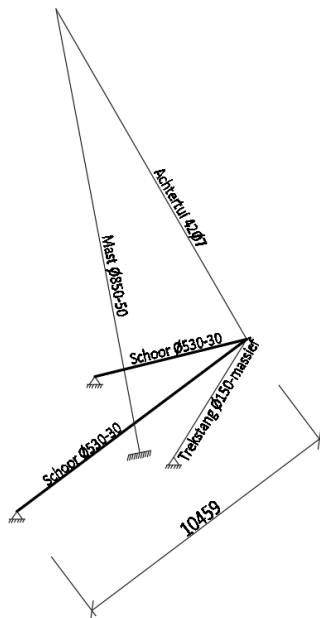
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} = 0,22 + 0,26 + 0,07 = 0,55 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

4. Schoren van de pyloon (ø530-30)

Stabiliteitscontrole

Het profiel wordt op stabiliteit getoetst op de plek van die uitbuigt. Dit is ongeveer op de halve hoogte.

Schema



Profiel wordt belast op druk

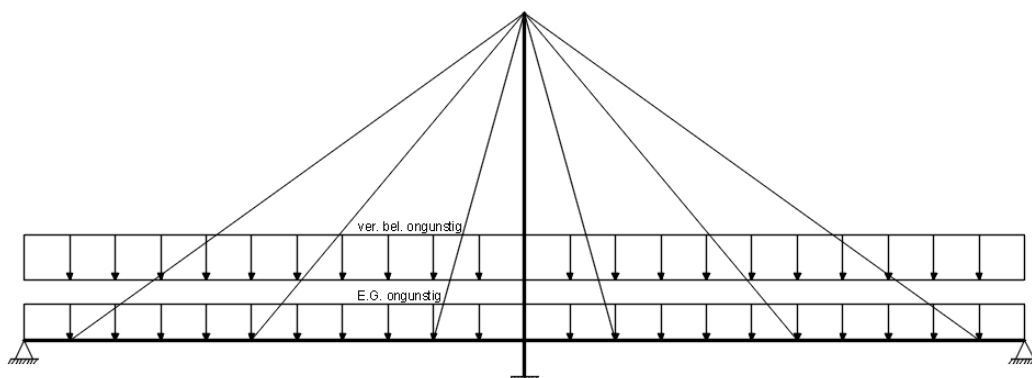
Gegevens buisprofiel ø530-30

$$A = 47124 \text{ mm}^2$$

$$I = 1477923 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

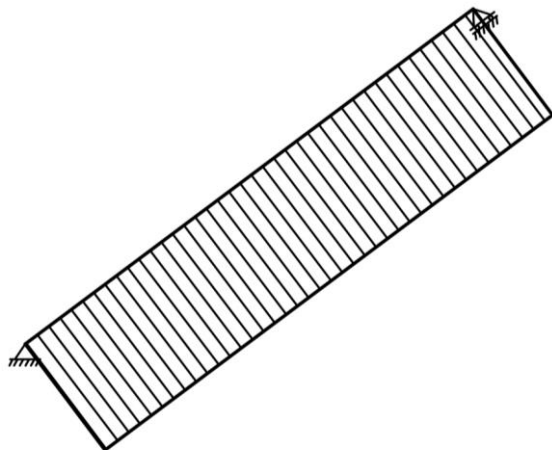
$$W = 5577 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Maatgevende belastingcombinatie



1,5*Eigen gewicht + 1,5*veranderlijke belasting + zettingen pyloon + wind van achter

Krachtenverdeling



$$N_{\max} = 1350 \text{ kN}$$

Knikkromme

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Tussenparameters

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{c,1} * I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 32300 * 1477923 * 10^4}{10459^2}$$

$$N_{cr} = 4339 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A * \rho * f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{47124 * 1,0 * 269}{4339 * 10^3}} = 1,74$$

$$\Phi = 0,5 * \left[1 + \alpha_f * (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2 \right]$$

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\alpha_f = 0,4$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,4 * (1,74 - 0,5) + 1,74^2] = 2,26$$

Uitkomst

$$\chi = \frac{1}{2,26 + \sqrt{2,26^2 - 1,74^2}}$$

$$\chi = 0,27$$

Unity check

toets

$$1,1 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belastingen

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{47124 * 1,0 * 269,0 * 0,27}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = 1587 \text{ kN}$$

Unity check

$$1,1 * \frac{1350}{1587} = 0,94 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Sterktecontrole

Unity check

toets

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belastingen

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{A * f_{c,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{A * f_{c,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{47124 * 269}{1,62 * 1,21}; \frac{47124 * 279}{1,62 * 1,21} \right\}$$

$$N_{c,Rd} = 6467 \text{ kN}$$

Unity check

$$\frac{1350}{6467} = 0,21 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

5. Kosten

De kosten van een VVK constructie hangt af van de laminaatopbouw en productiemethode van het VVK. Veel profielen van VVK worden vervaardigd met de pultrusie techniek. Het nadeel van deze methode is dat de machine de grootte van de profielen limiteert. De berekende profielen van de pyloon zijn zodanig groot, dat er een andere productiemethode gekozen moet worden. Een goed alternatief is de productiemethode wikkelen. Het Rotterdamse bedrijf Jules Dock is, op het moment van dit onderzoek, bezig met het ontwerpen van windturbines van VVK. Dit bedrijf maakt hierbij gebruik van de productiemethode wikkelen. Met behulp van dit bedrijf zijn de globale kosten geschat voor de berekende VVK pyloon. De kosten van zowel het hars als de vezels liggen op ongeveer €5 per kilogram materiaal.

De productie is nog een lastig punt. Momenteel heeft het bedrijf Jules Dock niet de juiste apparatuur om zulke profielen te maken. Dit heeft ook te maken met het gewicht van de pyloon. De mast van de pyloon weegt ongeveer 240 kg per meter. Dit zorgt voor grote doorbuiging als het profiel gemaakt wordt (over de lengte van 20 meter). Een oplossing hiervoor is om het profiel in delen te maken en achteraf aan elkaar te bevestigen.

		Lengte [m]	Opp./m ¹ [m ²]	Soort. Gew. [kg/m ³]	Prijs/kg	Productieprijs	Totale prijs
Stalen pyloon	Ø711-20	± 20000	0,043	7850	€4	€13.500	€40.000
	Ø273-16	± 10000	0,013	7850	€4	€4.000	€12.000
VVK pyloon	Ø850-50	± 20000	0,126	1912	€5	€20.000	€44.000
	Ø530-30	± 10000	0,047	1912	€5	€15.000	€33.000

6. Conclusie

De materiaal- en productiekosten zijn voor de VVK buisprofielen duurder dan de stalen buisprofielen. Hier zijn de onderhoudskosten niet in meegenomen. Gewoon staal heeft veel onderhoud nodig, terwijl VVK onderhoudsarm is. Er zijn wel maatregelen te nemen tegen de corrosie van staal, waardoor er minder onderhoud nodig is.

Hogeschool Rotterdam / Gemeente Rotterdam

VVK in tuibruggen

Bijlage V – Aanbeveling berekeningsrapport

Naam:	Lennart Kraaijenbrink
Studentnummer:	0884858
Versie:	1.0 (definitief)
Datum:	dinsdag 13 juni 2017

Inhoud

Inleiding.....	3
1. Uitgangspunten	4
Normen & voorschriften	4
Materialen.....	4
Ontwerpcriteria.....	4
Belasting-, conversie & materiaalfactoren.....	5
Belastingcombinaties	5
Belastingen	5
Permanente belastingen	5
Veranderlijke belasting.....	5
Gebruikte software	5
2. Overzicht constructie (bijlage VI)	6
3. Invoer rekenmodel	7
Geometrie	7
Profielgegevens	7
Opleggingen	7
Staafaansluitingen	7
Lastdefinitie en belastingcombinaties.....	7
Temperatuurbelasting.....	8
4. Brugdek	9
Gewichtsberekening.....	9
Traagheidsmoment	9
Toetsing op trillingen en comfort.....	10
Situatie 1.....	10
Situatie 2.....	11
Situatie 3.....	12
Toetsing op sterkte.....	13
Trekspanning in de huiden t.g.v. buigend moment	13
Dwarskracht in de lijven	14
Stabiliteit van het vakwerk.....	15
Knikvorm 1	15
Knikvorm 2	18
Lijmverbinding wandstaaf – randstaaf.....	24
5. Pyloon.....	25
Reductiefactor plooï en plaatimperfecties.....	25

Mast.....	25
Schoren.....	25
Mast van de pyloon.....	26
Stabiliteitscontrole	27
Sterktecontrole.....	29
Schoren van de pyloon.....	30
Stabiliteitscontrole	31
Sterktecontrole.....	32
6. Conclusie	33
Bibliografie	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
Bijlagen.....	34
Bijlage BV.A – rekenmodel rapport 2D brugdek	35
Bijlage BV.B – rekenmodel rapport 2D vakwerk	36
Bijlage BV.C – rekenmodel rapport 3D pyloon.....	37

Inleiding

Er bestaan al talloze bruggen in hout, beton en staal. Tegenwoordig hebben bruggen van vezelversterkt kunststof (VVK) bewezen dat ze goed toe te passen zijn op korte overspanningen. Deze overspanningen gaan tot ongeveer 30 meter. Om het als serieuze concurrentie te zien van de conventionele materialen zal VVK zich ook moeten bewijzen op grotere overspanningen.

In dit onderzoek wordt er een VVK brug met een overspanning van 100 meter beschouwd. Wanneer er glasvezels worden toegepast in het composiet is een vrije overspanning van 30 meter al moeilijk te halen met een VVK brug, laat staan 100 meter. Er wordt daarom onderzocht hoe een VVK brug eruit moet komen te zien in de vorm van een tuibrug. Als referentiebrug wordt de ringvaartplasbrug gebruikt.

Uit het onderzoek is gebleken of het de moeite waard is om VVK toe te passen in de ringvaartplasbrug. Er is een nieuw ontwerp gemaakt van de ringvaartplasbrug waarin VVK is toegepast in het brugdek, de mast van de pyloon en de schoren van de pyloon. Dit ontwerp is getoetst aan de huidige normen.

1. Uitgangspunten

Ten behoeve van de correctheid van de materiaaleigenschappen en factoren worden de waardes aangehouden zoals staat aangegeven in het document van InfraCore 'Dit is InfraCore Inside – Ontwerp en eigenschappen (revisie 010, 25 juli 2014)'. De achtergronden van de materiaaleigenschappen en factoren worden in dit bestand niet behandeld.

Normen & voorschriften

NEN-EN 1990	Grondslagen van constructief ontwerp
NEN-EN 1991-2	Verkeersbelasting op bruggen
NEN-EN 1993-2	Stalen bruggen
CUR-aanbeveling 96 (2003)	Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies
CUR-aanbeveling 96 (1 ^e herziende uitgave)	Vezelversterkte kunststoffen in bouwkundige en civieltechnische draagconstructies

Materialen

Staalkwaliteit constructiestaal:	S355
Staalkwaliteit tuien:	FE1650B
VVK materiaal:	

Tabel BV.1

Eigenschap	Eenheid	VVK profielen	Huiden	Randen	Vlakke lijfplaten	Dwarsverstijvers
ρ	kg/m ³	1912	1912	1912	1584	1584
E1	Mpa	32300	32300	25200	13800	8560
E2	Mpa	17400	17400	25200	13800	8560
G12	Mpa	5600	5600	5800	2930	6100
σ_{1t}	Mpa	558	558	334	217	75
σ_{2t}	Mpa	166	166	334	217	75
σ_{1c}	Mpa	269	269	209	198	84
σ_{2c}	Mpa	149	149	209	198	84
τ_{12}	Mpa	39	39	39	38	149

Tabel BV.2

Laminaat	Vezelrichtingen	Vezelrichtingfracties	Vezelvolumegehalte
VVK profielen	0/90°	75/25%	0,52
Huiden	0/90°	75/25%	0,52
Randen	0/90°	50/50%	0,52
Vlakke lijfplaten	0/90°	50/50%	0,28
Dwarsverstijvers	±45°	50/50%	0,28

Ontwerpcriteria

Gevolgklasse:	CC2
Referentieperiode:	100 jaar
Windgebied:	II

Belasting-, conversie & materiaalfactoren

Permanente belasting:	$\gamma_{G,j,sup} = 1,30$ (6.10a)
	$\gamma_{G,j,sup} = 1,20$ (6.10b)
	$\gamma_{G,j,inf} = 0,9$
Veranderlijke belasting:	$\gamma_Q = 1,35$ (verkeer)
	$\gamma_Q = 1,50$ (overig veranderlijk)
Materiaalfactor BGT:	$\gamma_{BGT} = 1$
Materiaalfactor UGT:	$\gamma_{UGT} = 1,62$
	$\gamma_c = 1,2$
Materiaalfactoren lijm:	$\gamma_{c,lijm} = 1,4$
	$\gamma_{M,lijm} = 2,57$

Conversiefactoren:

Tabel BV.3

Conversiefactor		Uiterste grenstoestand			Bruikbaarheidsgrenstoestand		
		STR/GEO (Sterkte) γ_{cs}	EQU (Stabiliteit) γ_{ck}	FAT (Vermoeiing) γ_{cv}	Vervorming γ_{cd}	Trillingen γ_{ct}	Eerste scheurvorming γ_{c1}
Temperatuur	γ_{ct}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Vocht	γ_{cv}	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Kruip	γ_{ck}	1,26	1,26		1,26		1,26
Vermoeiing	γ_{cf}		1,1		1,1	1,1	1,1
Kortdurend	γ_{c-k}	1,21	1,33	1,21	1,21	1,21	1,33
Langdurend	γ_{c-1}	1,52	1,68	1,21	1,68	1,33	1,68

Belastingcombinaties

De belastingcombinaties zijn conform NEN-EN 1990+A1+A1/C1:2011(+NB:2011) tabel NB.17.

Belastingen

Permanente belastingen

Eigen gewicht: $6,38 \text{ kN/m}^1$ (zie hoofdstuk 4)

Veranderlijke belasting

Gelijkmatig verdeelde belasting $q_{f,k}$: $2,0 + 120/(107+30) = 2,88 \text{ kN/m}^2$

Dienstvoertuig Q_{serv} : 25 kN/as

Het dienstvoertuig heeft twee assen met een wielbasis van 3 m en een spoorbreedte van 1,75 m.

Elk wiel heeft een contactvlak van $0,25 \times 0,25 \text{ m}$.

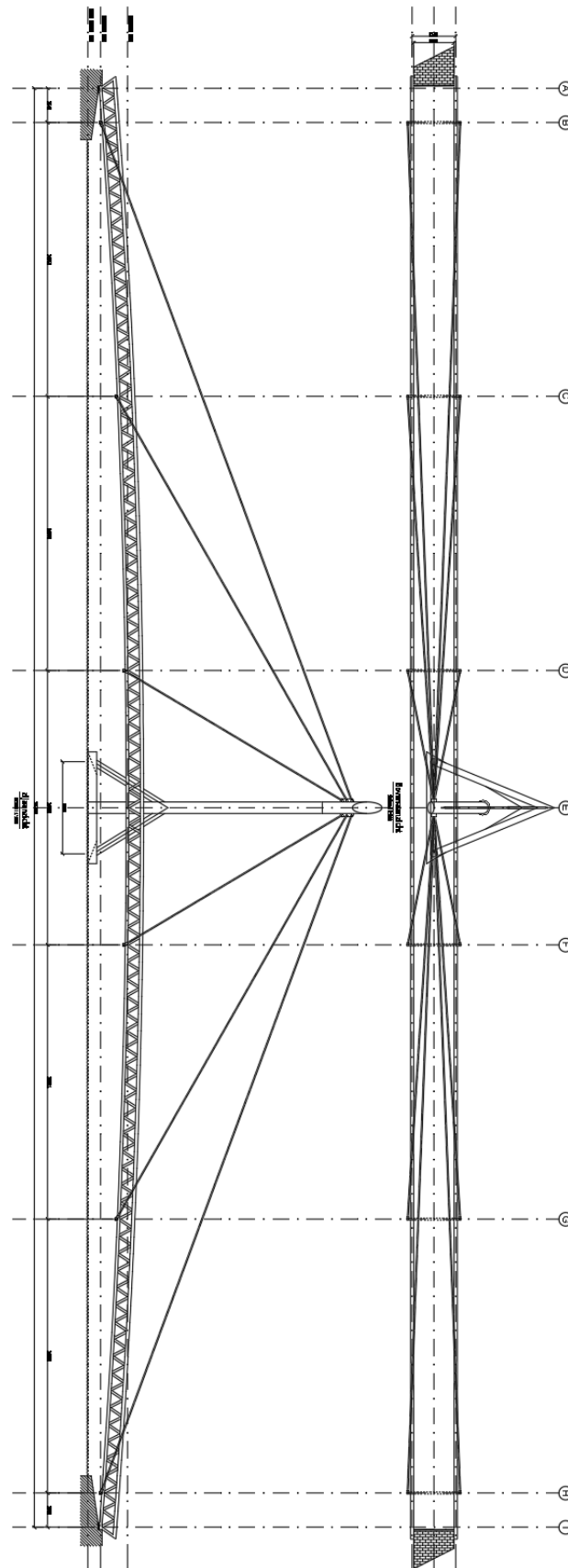
Windbelasting F_w : $1,5 \text{ kN/m}^1$

Gebruikte software

AutoCad 2015

MatrixFrame 5.2.9

2. Overzicht constructie (bijlage VI)



Figuur BV.1

3. Invoer rekenmodel

Geometrie

De stramienafmetingen zijn hetzelfde als de bestaande brug. Er zijn knopen waar de tuien zijn vastgemaakt aan het brugdek, daartussen zijn er rechte staven getrokken.

Profielgegevens

De volgende profielen zijn er gebruikt in het model

Tabel BV.4

Onderdeel	Profiel	Profielgegevens
Brugdek	VVK trog (handmatige invoer)	E-modulus: 32.300 MPa $I_t = 6,153 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$ $I_y = 1,889 \cdot 10^{-2} \text{ m}^4$ $I_z = 1,324 \cdot 10^{-1} \text{ m}^4$ $A = 0,109 \text{ m}^2$
Mast (pyloon)	Ø850-45, VVK	E-modulus: 32.300 MPa
Schoren (pyloon)	Ø480-30, VVK	E-modulus: 32.300 MPa
Trekstaaf (pyloon)	Ø150-massief, S355	E-modulus: 210.000 MPa
Tui (pyloon/achter)	Ø45-massief, Fe1650B	E-modulus: 205.000 MPa
Tuilen	Ø32,8-massief, Fe1650B	E-modulus: 200.000 MPa

De tuilen in de model wijken af van de werkelijkheid, namelijk 22Ø7 en 42Ø7 in de pyloon. De EA van de tuilen zijn gelijk gehouden t.b.v. de uitrekking van de tuilen.

Opleggingen

In zowel de X-richting als in de Y-richting is er een vrije oplegging gemaakt in het model. Er is uitgegaan van zakkings van 15 mm bij de landhoofden. Door dit te realiseren zijn de opleggingen in de Z-richting verend opgelegd. Door een puntlast van 15.000 kN op de opleggingen te plaatsen geeft dit een veerconstante k van 1.000.000 kNm ($k=F/\delta$).

Tabel BV.5

Oplegging	X	Y	Z	Xr	Yr	Zr
Landhoofd links 1	Vast	Vrij	Veer ($k=1.000.000 \text{ kNm}$)	Vrij	Vrij	Vrij
Landhoofd links 2	Vast	Vast	Veer ($k=1.000.000 \text{ kNm}$)	Vrij	Vrij	Vrij
Landhoofd rechts 1	Vrij	Vrij	Veer ($k=1.000.000 \text{ kNm}$)	Vrij	Vrij	Vrij
Landhoofd rechts 2	Vrij	Vast	Veer ($k=1.000.000 \text{ kNm}$)	Vrij	Vrij	Vrij
Mast (pyloon)	Vast	Vast	Vast	Vast	Vast	Vast
Schoren (pyloon)	Vast	Vast	Vast	Vrij	Vrij	Vrij
Trekstaaf (pyloon)	Vast	Vast	Vast	Vrij	Vrij	Vrij

Staafaansluitingen

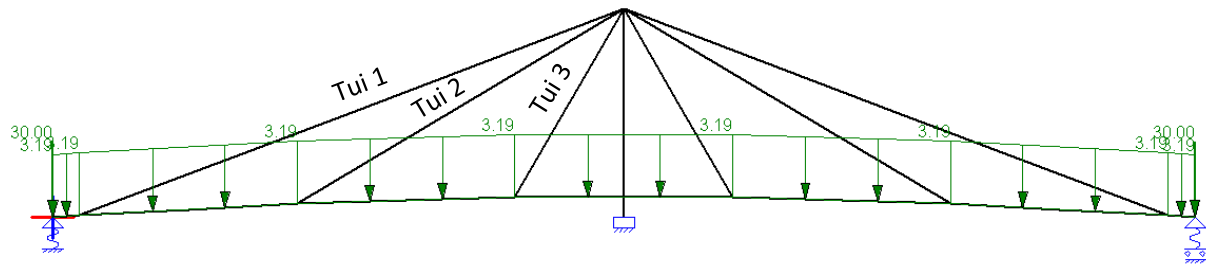
Alle tuilen zijn aan beiden kanten scharnierend verbonden. De rest van de knopen zijn momentvast.

Lastdefinitie en belastingcombinaties

De belastingen en belastingcombinaties zijn hetzelfde als in de oude berekening. Het programma is op de norm 'NEN-EN' gezet.

Temperatuurbelasting

De temperatuurbelasting wordt bepaald zoals beschreven in bijlage II.



Figuur BV.2

Tabel BV.6

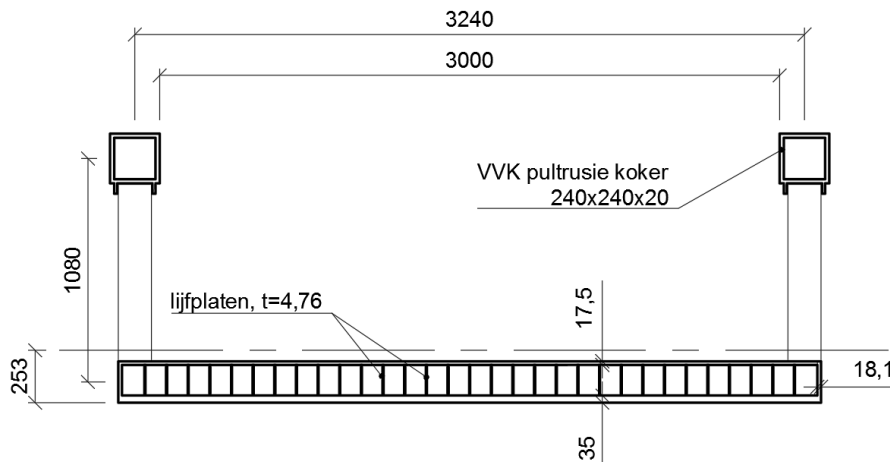
	Kracht [kN]	Opp. [mm ²]	Spanning [MPa]	Lengte tui [mm]	Hor. projectie tui [mm]	Startwaarde E-modulus E ₀ [MPa]	Fictieve E-modulus [MPa]
tui 1	217,13	846,66	256,46	54535,00	54515,00	205000	201266,79
tui 2	143,39	846,66	169,36	35632,00	35601,00	205000	199519,86
tui 3	61,54	846,66	72,69	20423,00	20368,00	205000	184066,71

Tabel BV.7

	Δl [mm]	Temperatuurslast [°]	Hoek α [°]	Fictieve k-factor
tui 1	69,5	-106,049	20,80	1109,84
tui 2	30,5	-70,676	30,73	2422,75
tui 3	8,1	-32,894	59,68	6587,06

4. Brugdek

Er wordt gekozen voor variant 4 uit bijlage III. De boutverbindingen worden vervangen door lijmverbindingen. De vakwerkleuning komt op VVK verbindingstukken te staan, die vastgelijmd worden op het VVK sandwichdek.



Figuur BV.3

Gewichtsberekening

Oppervlakte huden + randen:	0,183 m ² /m ¹
Oppervlakte lijfplaten (31 stuks):	0,022 m ² /m ¹
Gewicht huden + randen:	0,183*19,12 = 3,49 kN/m ¹
Gewicht lijfplaten:	0,022*15,84 = 0,34 kN/m ¹
Gewicht koker 240x240x20:	0,3 kN/m ¹
Gewicht koker 160x160x8:	0,14 kN/m ¹
Gewicht verbindingstuk:	0,1 kN/m ¹
Gewicht brugdekconstructie:	5,39 kN/m¹
5% tolerantie:	1,05*5,39 = 5,66 kN/m ¹
Slijtlaag, coating en injectiesysteem	0,72 kN/m ¹
Karakteristieke permanente belasting:	0,72 + 5,66 = 6,38 kN/m¹

Traagheidsmoment

Het traagheidsmoment wordt bepaald aan de hand van de formule $I_{\text{totaal}} = I_{\text{steiner}} + I_{\text{eigen}}$. De I_{steiner} wordt bepaald aan de hand van een gewogen evenwichtslijn (zwp). De randen hebben een andere E-modulus dan de huden en de randstaven. De ingevoerde breedte is bepaald door: $25200/32300*18,1 = 14,1$ mm.

	Aantal	b	h	A	a _{onder}	A*a _{onder}	a _{zwp}	I _{steiner}	I _{eigen}	I _{totaal} (I _y)
240x240x20	2	-	-	17600	1180	41536000	926,69	3,02E+10	2,87E+08	
Onderhuid	1	3400	35	119000	17,5	2082500	235,81	6,62E+09	1,21E+07	
Randen	2	14,1	200	2824	100	564854	153,31	1,34E+08	1,88E+07	
Bovenhuid	1	3400	17,5	59500	191,25	11379375	62,06	2,29E+08	1,52E+06	
Totaal				219348,5	253,31 (zwp)	55562729		3,73E+10	3,20E+08	3,77E+10

$$I_z = 2 * 17600 * 1620^2 + 2,86 * 10^8 + \frac{1}{12} * (35 + 17,5) * 3400^3 = 2,649 * 10^{11} \text{ mm}^4$$

$$I_x = I_{\text{torsie}} = \frac{t_{\text{huid}}^3}{3} (h + 2b)$$

$$I_x = I_{\text{torsie}} = \frac{17,5^3}{3} * (988,75 + 2 * 3240) + \frac{35^3}{3} * (1197,5 + 2 * 3240) = 1,231 * 10^8 \text{ mm}^4$$

Toetsing op trillingen en comfort

In de EUR 23984 EN moet worden gekozen wat het verwachte aantal personen is per tijdseenheid. Er wordt gekeken naar 3 situaties:

1. De situatie dat de brug vol met mensen staat. Dit zal slechts een aantal keer in de levensduur van de brug voorkomen
2. De situatie dat er een groep mensen/kinderen over de brug gaan. De brug ligt naast een basisschool en daarom wordt de kans geschat dat deze situatie wekelijks voor kan komen.
3. De situatie dat er 15 personen op de brug lopen. Dit zal dagelijks voorkomen.

De dempingsverhouding is materiaalafhankelijk. De CUR 96 geeft aan dat de gemiddelde dempingsverhouding voor een VVK constructie 1% is. Deze waarde is puur voor het materiaal zelf, maar bij de demping speelt alles mee wat aan of in de brug zit. Een stalen leuning of zelf een klein boutje verhogen de dempingsverhouding. De werkelijke dempingsverhouding voor een VVK constructie ligt dus in werkelijkheid hoger. In dit onderzoek wordt er een waarde van 2% aangehouden. Dit is een veilige waarde als er rekening wordt gehouden met de complexiteit van een tuibrug en het ontwerp er van.

De volgende waarden zijn uit het Matrixmodel van de sandwichconstructie gekomen. Eigenvorm 5 wordt als de fundamentele trilvorm beschouwd.

Tabel BV.8

Eigenvorm	Eigenwaarde	Natuurlijke rotatiefrequentie	Natuurlijke frequentie	Periode
1	0.067978	14.711	2.341	0.427
2	0.067584	14.796	2.355	0.425
3	0.046614	21.453	3.414	0.293
4	0.042839	23.343	3.715	0.269
5	0.037942	26.356	4.195	0.238
6	0.023284	42.949	6.835	0.146
7	0.018702	53.471	8.510	0.118
8	0.015284	65.428	10.413	0.096
9	0.011776	84.920	13.515	0.074
10	0.009320	107.301	17.078	0.059

Met een eigenfrequentie van 4,195 Hz moet een reductiecoëfficiënt (Ψ) van 0,25 aangehouden worden. De fundamentele eigenfrequentie in de laterale richting is gelijk aan 0,283 Hz.

De uitgangspunten en constanten zijn ontleend aan de EUR 23984 EN.

Situatie 1

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op 2,5 m/s²

$a_{\text{lock-in}}$ wordt gekozen op 0,15 m/s²

$$d = 1 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 321 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 638,13 * 107 = 34,14 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 7 * 10^{-3} * 321 = 2,25$$

$$k_1 = -0,07 * 4,195^2 + 0,56 * 4,195 + 0,084 = 1,20$$

$$k_2 = 0,004 * 4,195^2 - 0,045 * 4,195 - 1 = -1,16$$

$$\sigma_{F,lock} = 2,85 * 10^{-4} * 321 = 9,15 * 10^{-2}$$

$$k_{1,lock} = -0,08 * 0,283^2 + 0,44 * 0,283 + 0,096 = 0,21$$

$$k_{2,lock-in} = 0,007 * 0,283^2 - 0,07 * 0,283 - 1 = -1,02$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{0,95 * 0,01^{-1,08} * \frac{3,7 * 2,25^2}{34,14^2}} = 0,90$$

$$a_{max} = 3,80 * 0,90 = 3,37 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 3,37 = 1,35 \text{ m/s}^2 < 2,5 \text{ m/s}^2 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

$$\sigma_{a,lock-in} = 0,085$$

$$a_{d,lock-in} = 3,73 * 0,085 = 0,32 \text{ m/s}^2 < 0,15 \text{ m/s}^2 \rightarrow \text{Voldoet niet!}$$

Situatie 2

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $1,0 \text{ m/s}^2$

$a_{lock-in}$ wordt gekozen op $0,15 \text{ m/s}^2$

$$d = 0,2 \frac{\text{Personen}}{\text{m}^2} \rightarrow n = 3 * 107 * 1 = 64,2 \text{ Personen}$$

$$m^* = 0,5 * 638,13 * 107 = 34,14 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 64,2 = 0,77$$

$$k_1 = -0,07 * 4,195^2 + 0,6 * 4,195 + 0,075 = 1,36$$

$$k_2 = 0,003 * 4,195^2 - 0,04 * 4,195 - 1 = -1,12$$

$$\sigma_{F,lock} = 2,85 * 10^{-4} * 64,2 = 9,15 * 10^{-2}$$

$$k_{1,lock} = -0,08 * 0,283^2 + 0,5 * 0,283 + 0,085 = 0,22$$

$$k_{2,lock-in} = 0,005 * 0,283^2 - 0,06 * 0,283 - 1,005 = -1,02$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,02 * 0,02^{-1,07} * \frac{2,95 * 0,77^2}{34,14^2}} = 0,46$$

$$a_{max,d} = 3,92 * 0,46 = 1,79 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 1,79 = \mathbf{0,45 \text{ m/s}^2} < \mathbf{1,0 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

$$\sigma_{a,lock-in} = 0,036$$

$$a_{d,lock-in} = 3,77 * 0,036 = \mathbf{0,13 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,15 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Situatie 3

Uitgangspunten

a_{limit} wordt gekozen op $0,5 \text{ m/s}^2$

$a_{lock-in}$ wordt gekozen op $0,15 \text{ m/s}^2$

$n = 15$ Personen

$$m^* = 0,5 * 638,13 * 107 = 34,14 * 10^3 \text{ kg}$$

Tussenparameters

$$\sigma_F = 1,2 * 10^{-2} * 15 = 0,18$$

$$k_1 = -0,07 * 4,195^2 + 0,6 * 4,195 + 0,075 = 1,36$$

$$k_2 = 0,003 * 4,195^2 - 0,04 * 4,195 - 1 = -1,12$$

$$\sigma_{F,lock} = 2,85 * 10^{-4} * 15 = 4,28 * 10^{-3}$$

$$k_{1,lock} = -0,08 * 0,283^2 + 0,5 * 0,283 + 0,085 = 0,22$$

$$k_{2,lock-in} = 0,005 * 0,283^2 - 0,06 * 0,283 - 1,005 = -1,02$$

Uitkomst

$$\sigma_a = \sqrt{1,02 * 0,01^{-1,07} * \frac{2,95 * 0,18^2}{34,14^2}} = 0,22$$

$$a_{max,d} = 3,92 * 0,22 = 0,86 \text{ m/s}^2$$

$$a_d = 0,25 * 0,86 = \mathbf{0,22 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,5 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

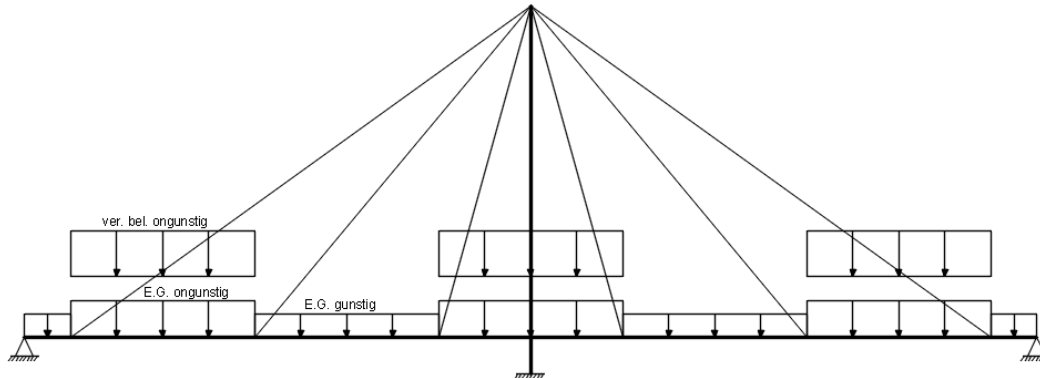
$$\sigma_{a,lock-in} = 0,017$$

$$a_{d,lock-in} = 3,77 * 0,036 = \mathbf{0,07 \text{ m/s}^2} < \mathbf{0,15 \text{ m/s}^2} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Toetsing op sterkte

Trekspanning in de huiden t.g.v. buigend moment

Maatgevende belastingcombinatie



Figuur BV.4

Maximaal moment tpv veld: 1118,6 kNm

Maximaal moment tpv tuiaansluiting: 968,2 kNm

Opneembare spanning

$$\sigma_{Rd} = \frac{\sigma_{1,t,huid}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{558}{1,62 * 1,21} = 285 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$I = 3776617 * 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_o = \frac{I}{e_o} = \frac{3776617 * 10^4}{253} = 149092 * 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_b = \frac{I}{e_b} = \frac{1241627 * 10^4}{1180 - 253} = 31559 * 10^3 \text{ mm}^3$$

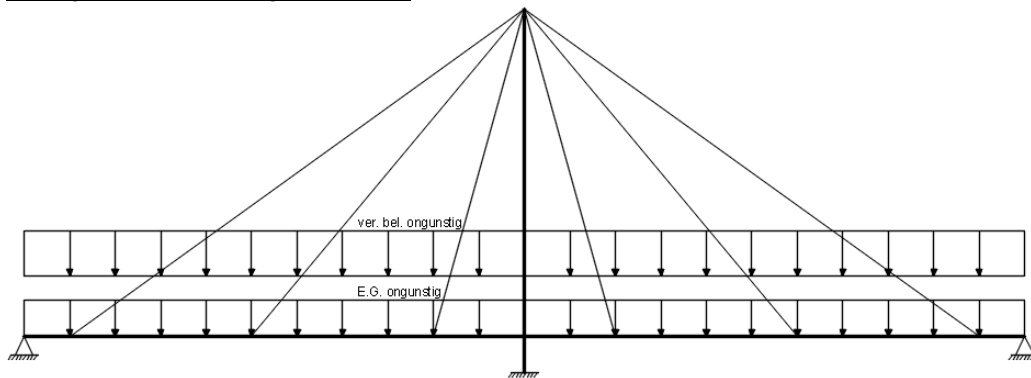
$$\sigma_{max} = \frac{M_{steunpunt}}{W_b} = \frac{968,2 * 10^6}{149092 * 10^3} = 31 \text{ MPa}$$

Unity check

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Rd}} = \frac{31}{285} = 0,11 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Dwarskracht in de lijven

Maatgevende belastingcombinatie



Figuur BV.5

Maximale dwarskracht op een lijfplaat: 19,6 kN

Opneembare spanning

$$\tau_{Rd} = \frac{\tau_{12,lijf}}{\gamma_{m,UGT} * \gamma_{ck,cs}} = \frac{64}{1,62 * 1,21} = 32,65 \text{ MPa}$$

Optredende spanning

$$\tau_{lijf,max} = \frac{V_{max}}{A_{lijf}} * \frac{3}{2} = \frac{19,6 * 10^3}{200 * 4,76} * \frac{3}{2} = 30,88 \text{ MPa}$$

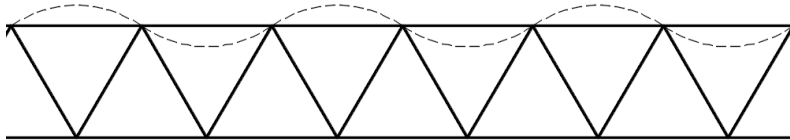
Unity check

$$\frac{\tau_{lijf,max}}{\tau_{Rd}} = \frac{30,88}{32,65} = 0,95 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Stabiliteit van het vakwerk

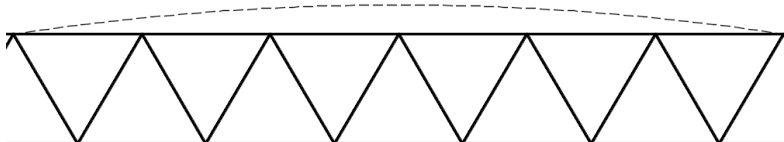
Het vakwerk wordt getoetst op stabiliteit conform de CUR 96+ 6.4.1.2 (knik). Het vakwerk wordt getoetst op 2 knikvormen. Plooi en plaatimperfecties zullen geen invloed hebben op deze soort profielen.

1. Het lokaal knikken van de staven (figuur BV.6). Hierbij wordt de kniklengte aangenomen als de lengte tussen de knopen. De staven worden getoetst op de maximale normaalkracht op de staven. De normaalkracht wordt uit een 2D rekenmodel gehaald waar het vakwerk in is gemodelleerd.



Figuur BV.6: geschematiseerde knikvorm van de randstaven

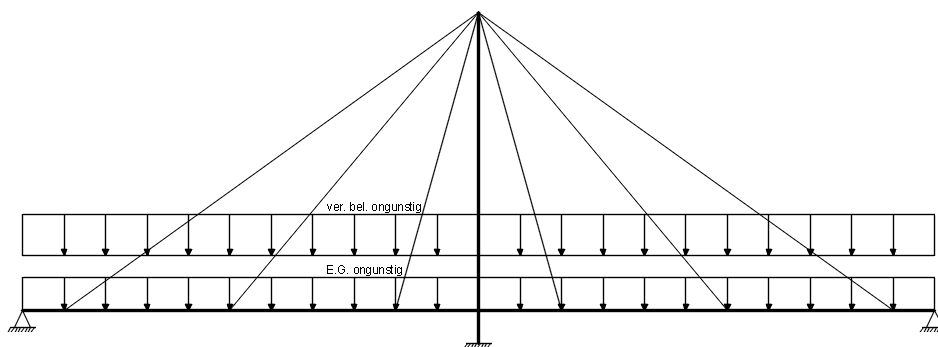
2. Het knikken van het vakwerk als samengestelde ligger (figuur BV.7). De kniklengte wordt bepaald aan de hand van NEN 6771 12.4.1.2. De randstaven worden getoetst het maximale veldmoment gedeeld door de afstand van de randstaven tot zwaartepunt ($M/a = F$). De wandstaven worden getoetst op de maximale dwarskracht. De krachtsverdeling wordt uit een 2D rekenmodel gehaald waar het vakwerk is gemodelleerd als een enkele staaf met samengestelde eigenschappen van het vakwerk.



Figuur BV.7: geschematiseerde knikvorm van de randstaven

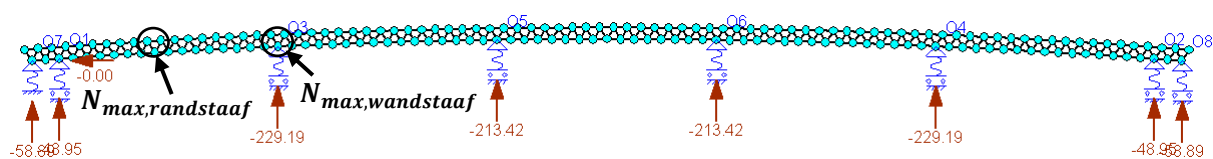
Knikvorm 1

Maatgevende belastingcombinatie



Figuur BV.8

krachtsverdeling



Figuur BV.9

$$N_{max,randstaaf} = 433,21 \text{ kN}$$

$$N_{max,wandstaaf} = 141,48 \text{ kN}$$

Randstaven

Knikkromme

Formule

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Tussenparameters

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{c,1} * I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 32300 * 14315 * 10^4}{1275^2}$$

$$N_{cr} = \mathbf{28071 \text{ kN}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A * \rho * f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{17600 * 1,0 * 269}{28071 * 10^3}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \mathbf{0,41}$$

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\bar{\lambda}_f < \bar{\lambda}_{f,0} \rightarrow \chi = \mathbf{1,0}$$

Unity check

Toets

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belasting

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{17600 * 1,0 * 269 * 1,0}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = \mathbf{2196 \text{ kN}}$$

Unity check

$$\frac{433}{2196} = \mathbf{0,19} < \mathbf{1,0} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

wandstaven

Knikkromme

Formule

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Tussenparameters

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{c,1} * I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 32300 * 1878 * 10^4}{1254^2}$$

$$N_{cr} = 3807 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A * \rho * f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{4864 * 1,0 * 269}{3807 * 10^3}}$$

$$\bar{\lambda}_f = 1,12$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha_f * (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2]$$

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\alpha_f = 0,4$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,4 * (1,12 - 0,5) + 1,12^2]$$

$$\Phi = 1,24$$

Uitkomst

$$\chi = \frac{1}{1,24 + \sqrt{1,24^2 - 1,12^2}}$$

$$\chi = 0,56$$

Unity check

Toets

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belasting

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{4864 * 1,0 * 269 * 0,56}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = 1221 \text{ kN}$$

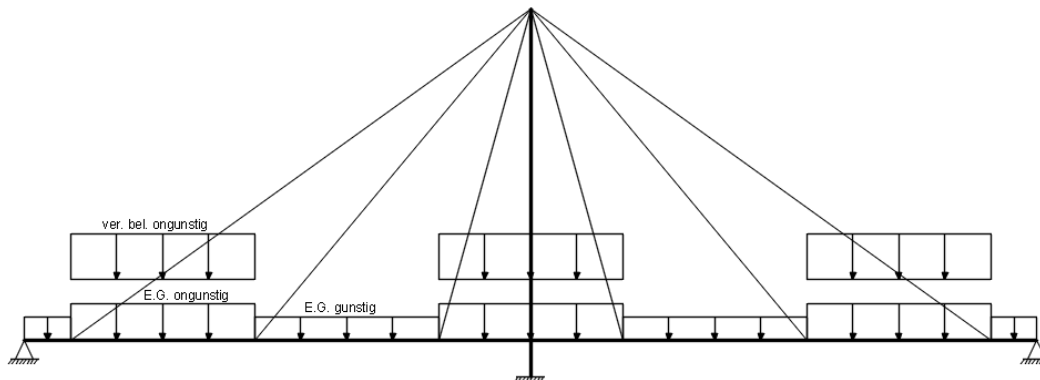
Unity check

$$\frac{141}{1221} = 0,12 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Knikvorm 2

Randstaven

Maatgevende belastingcombinatie



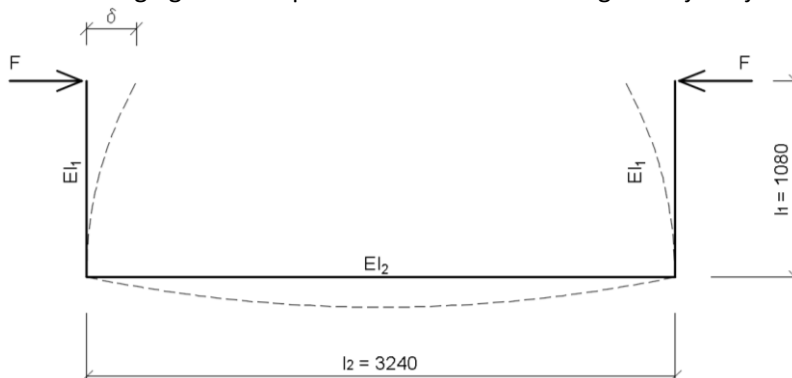
Figuur BV.10

Kniklengte

De kniklengte wordt bepaald aan de hand van NEN 6771 12.1.4.2. Hierbij wordt de randstaaf als een scharnierend opgelegd systeem beschouwd met, ter plaatse van de wandstaven, verende ondersteuning. De k-factoren van wandstaven wordt bepaald met vergelijking BV.1.

$$k = \frac{F}{\delta} \quad [BV.1]$$

De doorbuiging wordt bepaald aan de hand van 'vergeet-mij-nietjes' met het volgende schema:



Figuur BV.11

Bepaling EI

$$E_{Rd} = \frac{E_1}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$E_{Rd} = \frac{32300}{1,62 * 1,33} = 14980 \text{ MPa}$$

$$E_{Rd} = 14980 \text{ MPa}$$

$$I_{\text{randstaaf}} = \frac{1}{12} * 240^4 - \frac{1}{12} * (240 - 2 * 20)^4 = 14315 * 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_{\text{wandstaaf}} = \frac{1}{12} * 160^4 - \frac{1}{12} * (160 - 2 * 8)^4 = 1878 * 10^4 \text{ mm}^4$$

b	h	A	a	I_{steiner}	I_{eigen}	I_{totaal}
1275	17,5	22312,5	124,5833333	346312467,4	569433,5938	346881901
1275	35	44625	49,16666667	107874739,6	4555468,75	112430208,3
I_{sandwich}						$45931,21 * 10^4 \text{ mm}^4$

$$EI_1 = \frac{32300}{1,62 * 1,33} * 1878 * 10^4 * 2 = 5,63 * 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

$$EI_2 = \frac{32300}{1,62 * 1,33} * 45931,21 * 10^4 = 6,88 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

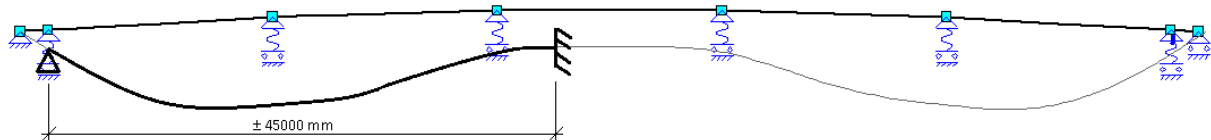
Bepaling kniklengte

$$\delta = \frac{Fl_1^3}{3EI_1} + \left(\frac{Fl_1 * l_2}{3EI_2} \right) * l_1 + \left(\frac{Fl_1 * l_2}{6EI_2} \right) * l_1$$

$$\delta = \frac{1254^3}{3 * 5,63 * 10^{11}} + 1,5 * \frac{1254^2 * 3240}{3 * 6,88 * 10^{12}} = 1,17 * 10^{-3} + 0,37 * 10^{-3} = 1,54 * 10^{-3} F$$

$$k = \frac{F}{\delta} \rightarrow k = 650 \text{ Nmm}^2$$

de wandstaven worden niet als star beschouwd.



Figuur BV.12

Figuur BV.12 geeft de doorbuigingslijn weer van de brug. Tussen de 2 eerste verende ondersteuning zal het maximale moment optreden. Om de kniklengte te bepalen wordt uit de doorbuigingslijn een systeem gehaald met aan één zijde een scharnier en aan de andere zijde een inklemming. Dit systeem wordt met de factor $1/\sqrt{2}$ omgezet naar een tweezijdig scharnierend systeem.

$$l_{\text{sys}} = \frac{\pm 45000}{\sqrt{2}} \approx 32000 \text{ mm}$$

$$\beta_{\text{rel}} = \frac{\beta l^4}{16EI} \quad [\text{BV.2}]$$

$$\beta_{\text{rel}} = \frac{\left(\frac{650}{1275} \right) * 32000^4}{16 * \left(\frac{32300}{1,62 * 1,33} \right) * 14315 * 10^4} = 15230$$

$$\frac{l_{\text{buc}}}{l} = \frac{\pi^4}{2} \sqrt{\frac{1}{4 * \beta_{\text{rel}}}} \quad [\text{BV.3}]$$

$$\frac{l_{\text{buc}}}{l} = \frac{\pi^4}{2} \sqrt{\frac{1}{4 * 15230}} = 0,1 \rightarrow l_{\text{buc}} = 3181,5 \text{ mm}$$

Knikkromme

Formule

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Tussenparameters

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{c,1} * I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 32300 * 14315 * 10^4}{3181,5^2}$$

$$N_{cr} = 4508 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A * \rho * f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{17600 * 1,0 * 269}{4508 * 10^3}}$$

$$\bar{\lambda}_f = 1,02$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha_f * (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2]$$

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\alpha_f = 0,4$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,4 * (1,02 - 0,5) + 1,02^2]$$

$$\Phi = 1,13$$

Uitkomst

$$\chi = \frac{1}{1,13 + \sqrt{1,13^2 - 1,02^2}}$$

$$\chi = 0,62$$

Unity check

Toets

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belasting

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{17600 * 1,0 * 269 * 0,62}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = 1367 \text{ kN}$$

Optredende belasting

$$M_{\max} = 1200,77 \text{ kNm}$$

Afstand hart randstaaf – neutrale lijn = 927 mm

$$F_d = \frac{1118,6}{0,927} = 1207 \text{ kN}$$

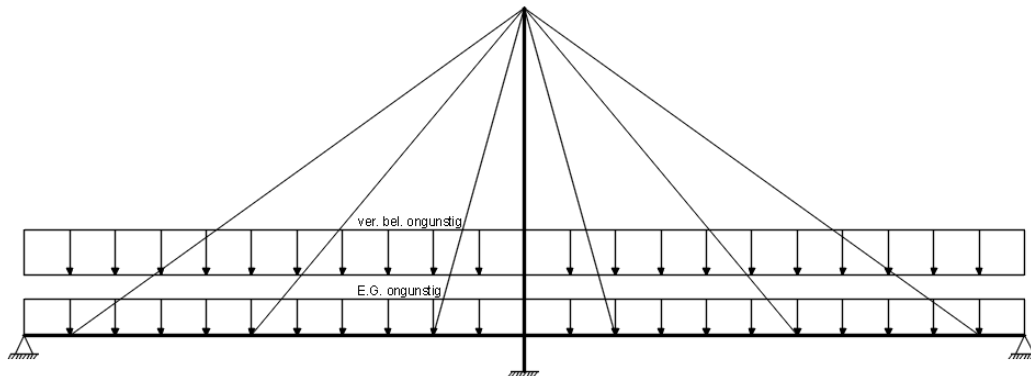
Per randstaaf 603kN.

Unity check

$$\frac{603}{1367} = 0,44 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Wandstaven

Maatgevende belastingcombinatie



Figuur BV.13

Kniklengte

$$l_{buc} = l_{sys} = \sqrt{1080^2 + \left(\frac{1275}{2}\right)^2} = 1254 \text{ mm}$$

Knikkromme

Formule

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Tussenparameters

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{c,1} * I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 32300 * 1878 * 10^4}{1254^2}$$

$$N_{cr} = 3807 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A * \rho * f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{4864 * 1,0 * 269}{3807 * 10^3}}$$

$$\bar{\lambda}_f = 1,12$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha_f * (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2]$$

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\alpha_f = 0,4$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,4 * (1,12 - 0,5) + 1,12^2]$$

$$\Phi = 1,24$$

Uitkomst

$$\chi = \frac{1}{1,24 + \sqrt{1,24^2 - 1,12^2}}$$

$$\chi = 0,56$$

Unity check

Toets

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belasting

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{4864 * 1,0 * 269 * 0,56}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = 1221 \text{ kN}$$

Optredende belasting

$$V_{\max} = 253,34 \text{ kNm}$$

$$F_d = \frac{1254}{1080} * 253,34 = 294 \text{ kN}$$

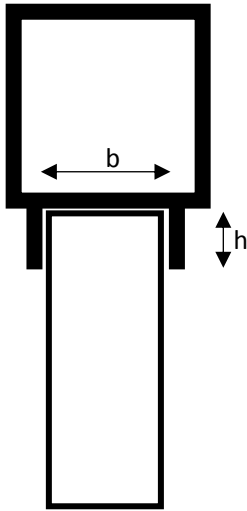
Per wandstaaf 147 kN.

Unity check

$$\frac{147}{1221} = 0,12 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Lijmverbinding wandstaaf – randstaaf

De lijmverbinding wordt getoetst op dwarskracht. De maximale dwarskracht bedraagt 247 kN (knikberekening wandstaven). Er wordt gebruik gemaakt van Plexus MA560 metacrylaatlijm. Deze lijm kan een afschuifspanning van 12,5 MPa opnemen.



Figuur BV.14

t_{lijmlaag}	10 mm	
h	70 mm	
b	180 mm	
F	247000 N	
A_{lijm}	3200 mm ² /mm	$(2 \cdot h \cdot t + b \cdot t)$
$\tau_{\text{optredend}}$	77,19 MPa/mm	(F/A)
breedte wandstaaf	160 mm	
γ_c	1,2	(uitgangspunten)
$\gamma_{c,\text{lijm}}$	1,4	(uitgangspunten)
$\gamma_{M,\text{lijm}}$	2,57	(uitgangspunten)
τ_{Rk}	12,5 MPa	
τ_{Rd}	4,86 MPa	$(\tau_{Rk}/\gamma_{M,\text{lijm}})$
τ_{Ed}	4,50 MPa	$(\tau_{\text{optredend}} \cdot (\gamma_{c,\text{lijm}}/\gamma_c) \cdot \text{breedte wandstaaf}/A_{\text{lijm}})$
Unity check	0,93	Voldoet!

5. Pyloon

Reductiefactor plooï en plaatimperfecties

Getoetst moet worden of plooïen belangrijke invloed heeft op de stijfheid heeft.

$$\rho = \frac{f_{c,stab,k}}{f_{c,k}} \leq 1,0$$

$$\rho = \frac{f_{b,stab,k}}{f_{c,k}} \leq 1,0$$

$f_{c,stab,k}$ is afhankelijk van de mate van de buigstijfheid van het profiel. Deze kan worden bepaald door middel van een vereenvoudigd D-matrix. De elementen van de D-matrix moeten worden berekend met de rekenwaarden van de materiaalstijfheden ($E_{c,1}$, $E_{c,2}$ en G_{12}).

Mast

Vereenvoudigde D-matrix

$$D_{11} = 257483237 \text{ MPa}$$

$$D_{22} = 40392651 \text{ MPa}$$

$$D_{12} = 138706140 \text{ MPa}$$

$$D_{66} = 42525000 \text{ MPa}$$

$$K = 0,00005$$

Reductiefactor voor knik

$$f_{c,stab,k} = 244 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{244}{269} = 0,91$$

Reductiefactor voor kip

$$f_{b,stab,k} = 1487 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{1487}{269} = 5,53 > 1,0 \rightarrow 1,0 \text{ aanhouden}$$

Schoren

Vereenvoudigde D-matrix

$$D_{11} = 76291330 \text{ MPa}$$

$$D_{22} = 11968193 \text{ MPa}$$

$$D_{12} = 41098116 \text{ MPa}$$

$$D_{66} = 12600000 \text{ MPa}$$

$$K = 0,0001$$

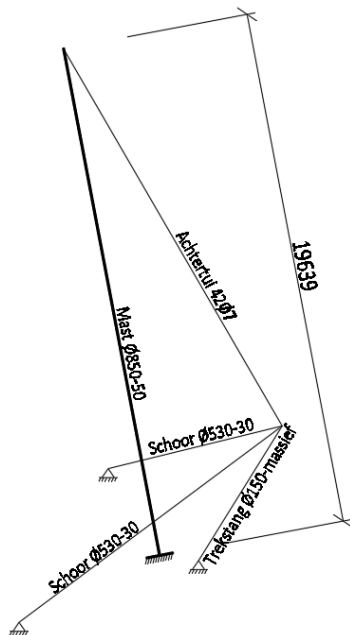
Reductiefactor voor knik

$$f_{c,stab,k} = 340 \text{ MPa}$$

$$\rho = \frac{340}{269} = 1,27 > 1,0 \rightarrow 1,0 \text{ aanhouden}$$

Mast van de pyloon

Schema



Figuur BV.15

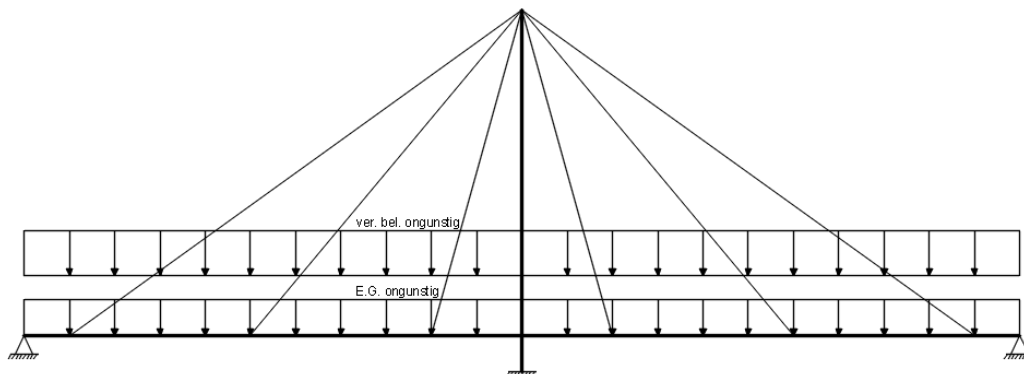
Gegevens buisprofiel Ø480-30

$$A = 42412 \text{ mm}^2$$

$$I = 107831 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W = 4492 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

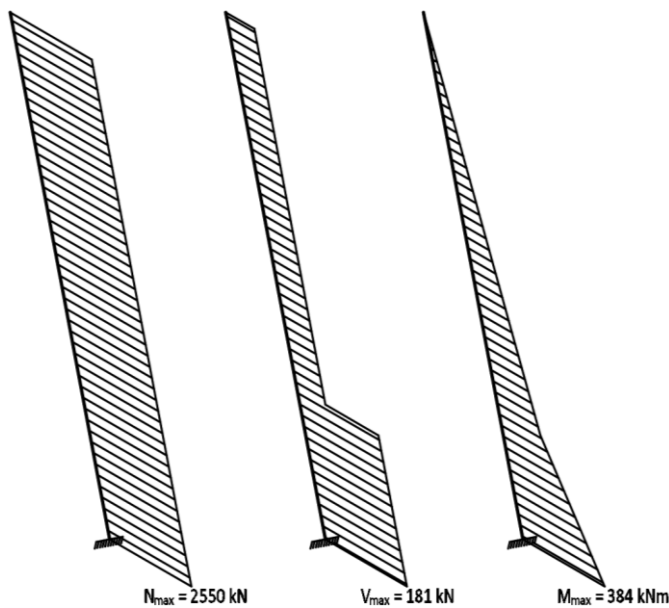
Maatgevende belastingcombinatie



Figuur BV.16

1,5*Eigen gewicht + 1,5*veranderlijke belasting + zettingen pyloon + wind van achter

Krachtenverdeling



Figuur BV.17

Stabiliteitscontrole

Formule

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Tussenparameters

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{c,1} * I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 32300 * 924730 * 10^4}{19639^2}$$

$$N_{cr} = 7643 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A * \rho * f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{113804 * 1,0 * 269}{7643 * 10^3}}$$

$$\bar{\lambda}_f = 1,91$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha_f * (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2]$$

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\alpha_f = 0,4$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,4 * (1,91 - 0,5) + 1,91^2]$$

$$\Phi = 2,60$$

Uitkomst

$$\chi = \frac{1}{2,60 + \sqrt{2,60^2 - 1,91^2}}$$

$$\chi = 0,23$$

Unity check

Toets

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + k_{yy} \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + k_{zy} \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belasting

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{113804 * 0,91 * 269 * 0,23}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = 2952 \text{ kN}$$

$$M_{b,Rd} = \frac{W * \rho * f_{c,k} * \chi_{LT}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$M_{b,Rd} = \frac{21758 * 1,0 * 269 * 1,0}{1,62 * 1,33}$$

$$M_{b,Rd} = 2714 \text{ kNm}$$

Interactiefactoren

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0,06 \frac{N_{Ed}}{\chi * N_{Rk}} \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M1}} \right)$$

$$C_{my} = 0,6$$

$$k_{yy} = 0,6 * \left(1 + 0,06 \frac{2550}{2952 * 1,2} \right)$$

$$k_{yy} = 0,63$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi * N_{Rk}} \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M1}}$$

$$C_{mLT} = 0,6$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{0,05}{(0,6 - 0,25)} * \frac{2550}{2952 * 1,2}$$

$$k_{zy} = 0,90$$

Unity check

$$\frac{2550}{2952} + 0,63 * \frac{192}{2714} = \mathbf{0,91} < \mathbf{1,0} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

$$\frac{2550}{2952} + 0,90 * \frac{192}{2714} = \mathbf{0,93} < \mathbf{1,0} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Sterktecontrole

Het profiel wordt getoetst op sterkte ter plaatse van de inklemming.

Unity check**Toets**

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belastingen

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{A * f_{c,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{A * f_{c,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{113804 * 269}{1,62 * 1,21}; \frac{113804 * 244}{1,62 * 1,21} \right\}$$

$$\mathbf{N_{c,Rd} = 14152 \text{ kN}}$$

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \frac{W * f_{b,c,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{W * f_{b,c,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \frac{23747 * 10^3 * 269}{1,62 * 1,21}; \frac{23747 * 10^3 * 1487}{1,62 * 1,21} \right\}$$

$$\mathbf{M_{y,Rd} = 2986 \text{ kNm}}$$

$$V_{z,Rd} = \min \left\{ \frac{A_v * \tau_{12,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{A_v * \tau_{12,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$V_{z,Rd} = \min \left\{ \frac{113804 * 39}{1,62 * 1,21}; \frac{113804 * 509,92}{1,62 * 1,21} \right\}$$

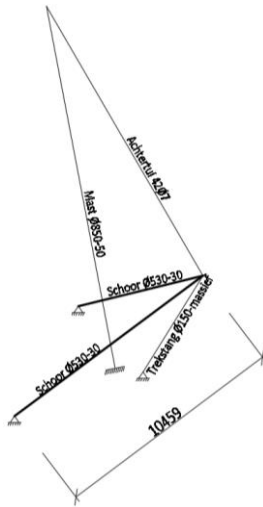
$$\mathbf{V_{z,Rd} = 2264 \text{ kN}}$$

Unity check

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} = 0,18 + 0,06 + 0,08 = \mathbf{0,33} < \mathbf{1,0} \rightarrow \mathbf{Voldoet!}$$

Schoren van de pyloon

Schema



Figuur BV.18

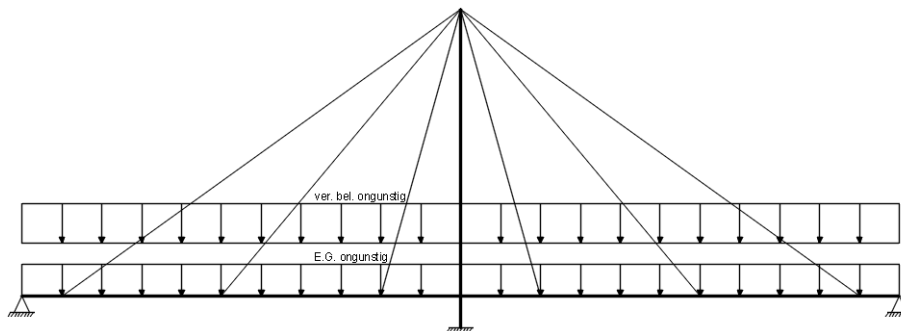
Gegevens buisprofiel Ø480-30

$$A = 42412 \text{ mm}^2$$

$$I = 107831 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W = 4492 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

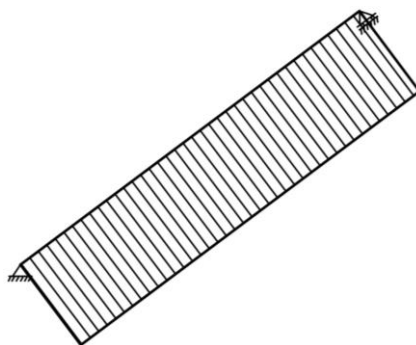
Maatgevende belastingcombinatie



Figuur BV.19

1,5*Eigen gewicht + 1,5*veranderlijke belasting + zettingen pyloon + wind van achter

Krachtenverdeling



$$N_{\max} = 936 \text{ kN}$$

Figuur BV.20

Stabiliteitscontrole

Formule

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \leq 1,0$$

Tussenparameters

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E_{c,1} * I_1}{l_{cr}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * 32300 * 107831 * 10^4}{10459^2}$$

$$N_{cr} = 3142 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{A * \rho * f_{c,k}}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda}_f = \sqrt{\frac{42412 * 1,0 * 269}{3142 * 10^3}}$$

$$\bar{\lambda}_f = 2,14$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha_f * (\bar{\lambda}_f - \bar{\lambda}_{f,0}) + \bar{\lambda}_f^2]$$

$$\bar{\lambda}_{f,0} = 0,5$$

$$\alpha_f = 0,4$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + 0,4 * (2,14 - 0,5) + 2,14^2]$$

$$\Phi = 3,12$$

Uitkomst

$$\chi = \frac{1}{2,60 + \sqrt{2,60^2 - 1,91^2}}$$

$$\chi = 0,19$$

Unity check

Toets

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belasting

$$N_{b,Rd} = \frac{A * \rho * f_{c,k} * \chi}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,ck}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{42412 * 1,0 * 269 * 0,19}{1,62 * 1,33}$$

$$N_{b,Rd} = 981 \text{ kN}$$

Unity check

$$\frac{936}{981} = 0,95 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

Sterktecontrole

Het profiel wordt getoetst op sterkte ter plaatse van de inklemming.

Unity check

Toets

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} \leq 1,0$$

Opneembare belastingen

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{A * f_{c,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}}; \frac{A * f_{c,stab,k}}{\gamma_{M,UGT} * \gamma_{ck,cs}} \right\}$$

$$N_{c,Rd} = \min \left\{ \frac{42412 * 269}{1,62 * 1,21}; \frac{42412 * 340}{1,62 * 1,21} \right\}$$

$$N_{c,Rd} = 5820 \text{ kN}$$

Unity check

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,16 < 1,0 \rightarrow \text{Voldoet!}$$

6. Conclusie

Net als in het onderzoek zullen de mast en de schoren van de pyloon van VVK zijn. Ten behoeve van de stabiliteit van de top van de pyloon zal de trekstang en achtertui van staal blijven.

Het brugdek bestaat uit een sandwichconstructie met daarop een gemonteerde leuning. De leuning werkt constructief mee aan de stijfheid en er wordt ontworpen op een minimale eigenfrequentie van 2,3 Hz. Dit wordt als een veilig ontwerp gezien en bovendien goed te doen in kosten. De laterale trillingen in het brugdek worden nu ook getoetst aan het comfort van de gebruiker. Hierbij is gebleken dat wanneer de brug helemaal vol staat met mensen, dat de comforteisen niet voldoen. Deze overschrijding wordt acceptabel geacht om een aantal redenen. Volgens onderzoek zijn de gestelde eisen in EUR 23984 EN te scherp en kunnen soepeler genomen worden. Daarnaast zullen de gebruikers die trillingen als oncomfortabel ervaren de brug verlaten. Hiermee worden de trillingen ook minder.

Het vakwerk wordt getoetst op knik, waarin er naar twee situaties wordt gekeken: het lokaal knikken van de staven en het knikken van het vakwerk als geheel. De laatst genoemde blijkt maatgevend, maar voldoet met een unity check van 0,44.

Bijlagen

Overzicht bijlagen

- A. rekenmodel rapport 2D brugdek
- B. rekenmodel rapport 2D vakwerk
- C. rekenmodel rapport 3D pyloon

Bijlage BV.A – rekenmodel rapport 2D brugdek

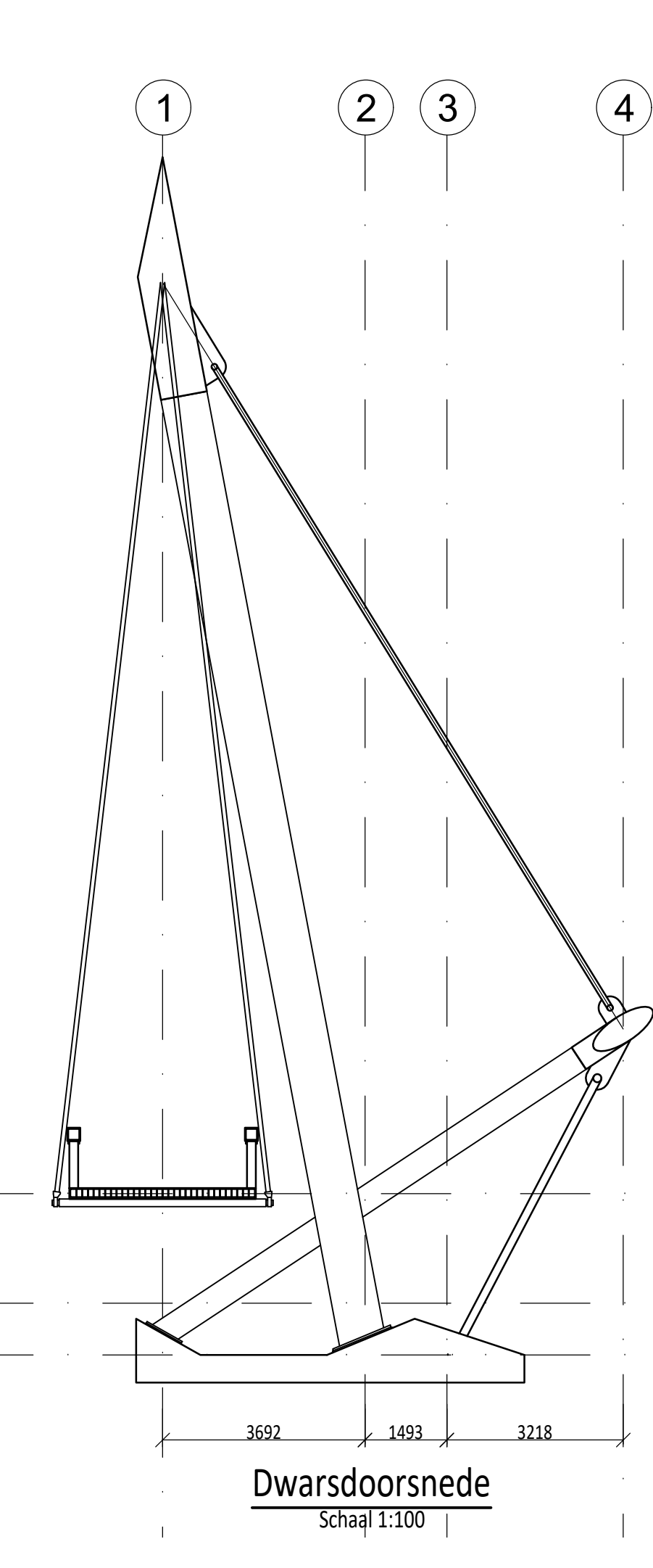
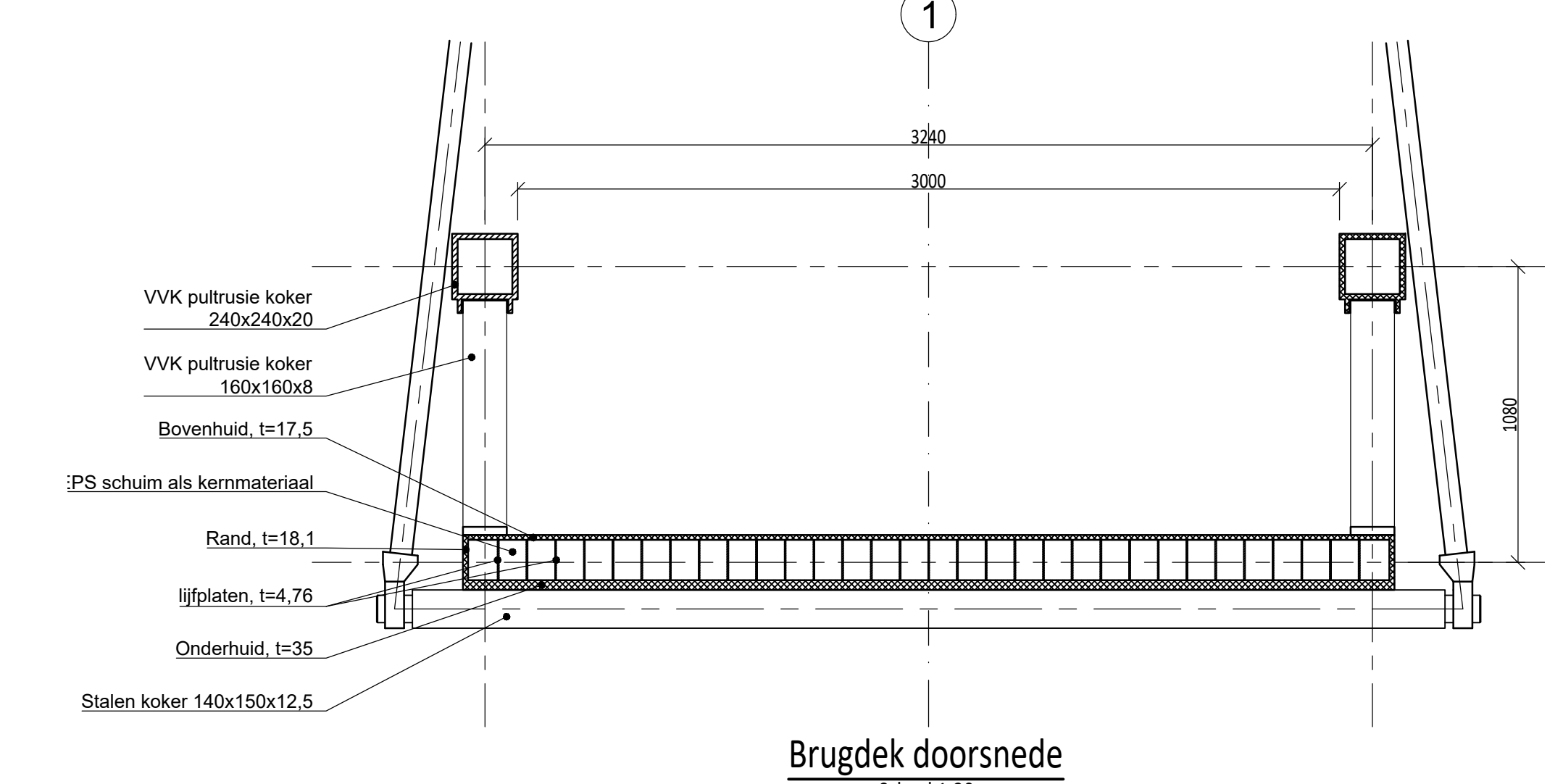
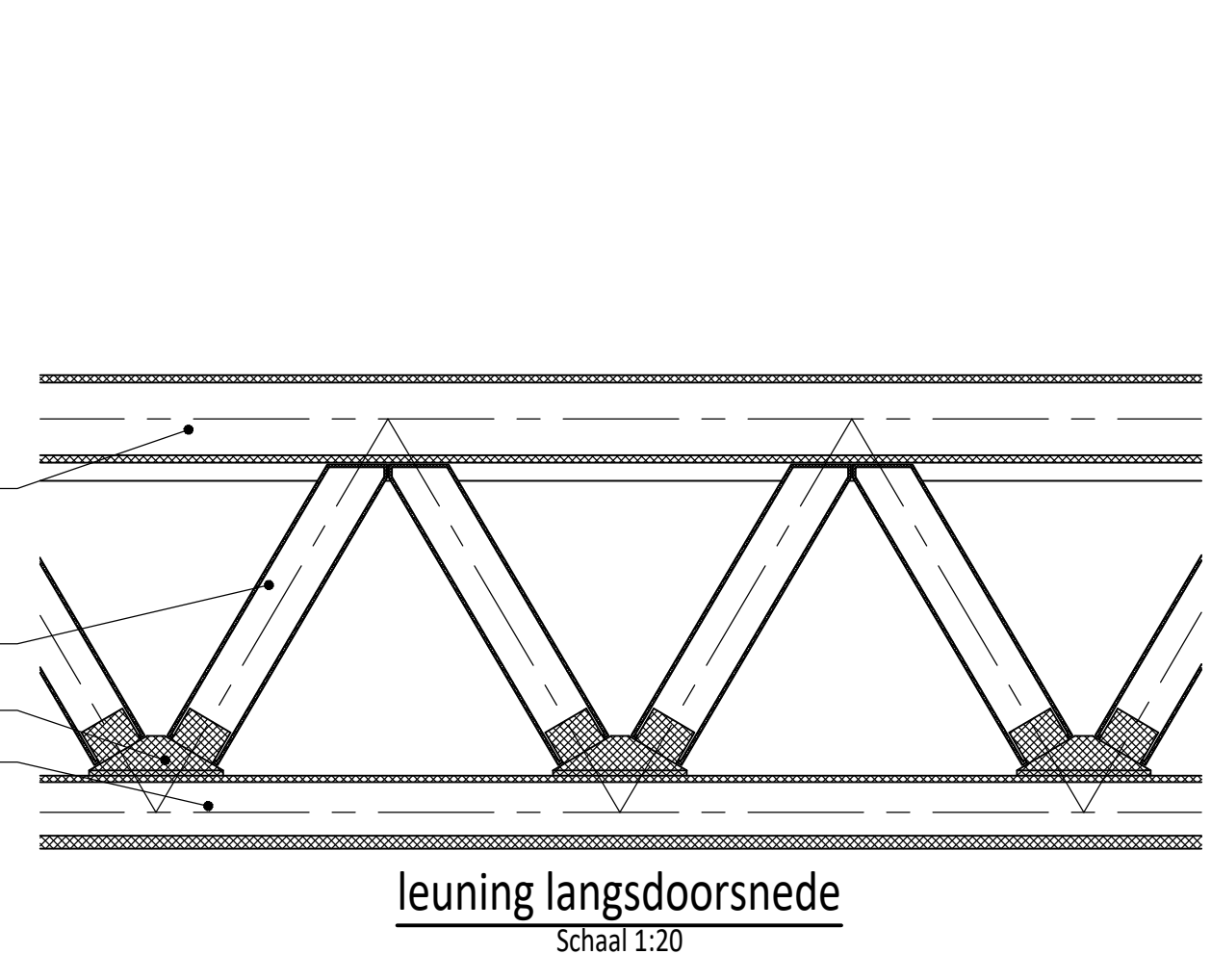
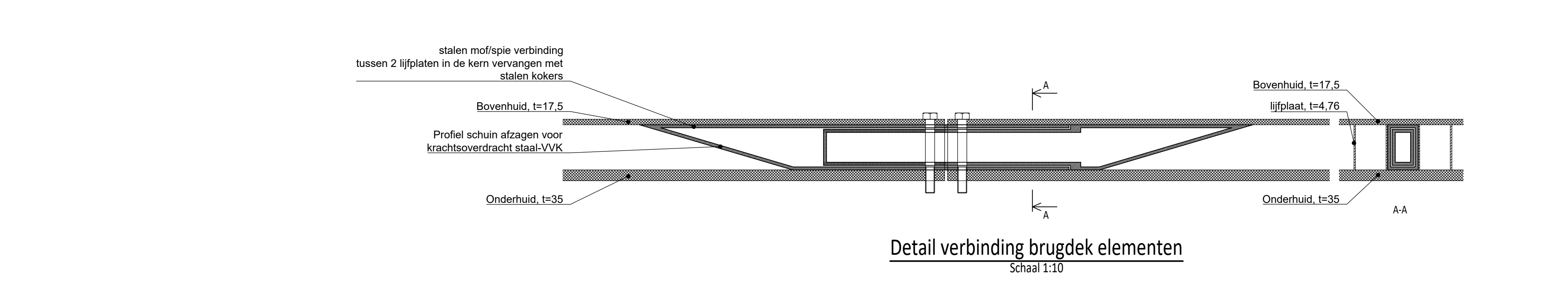
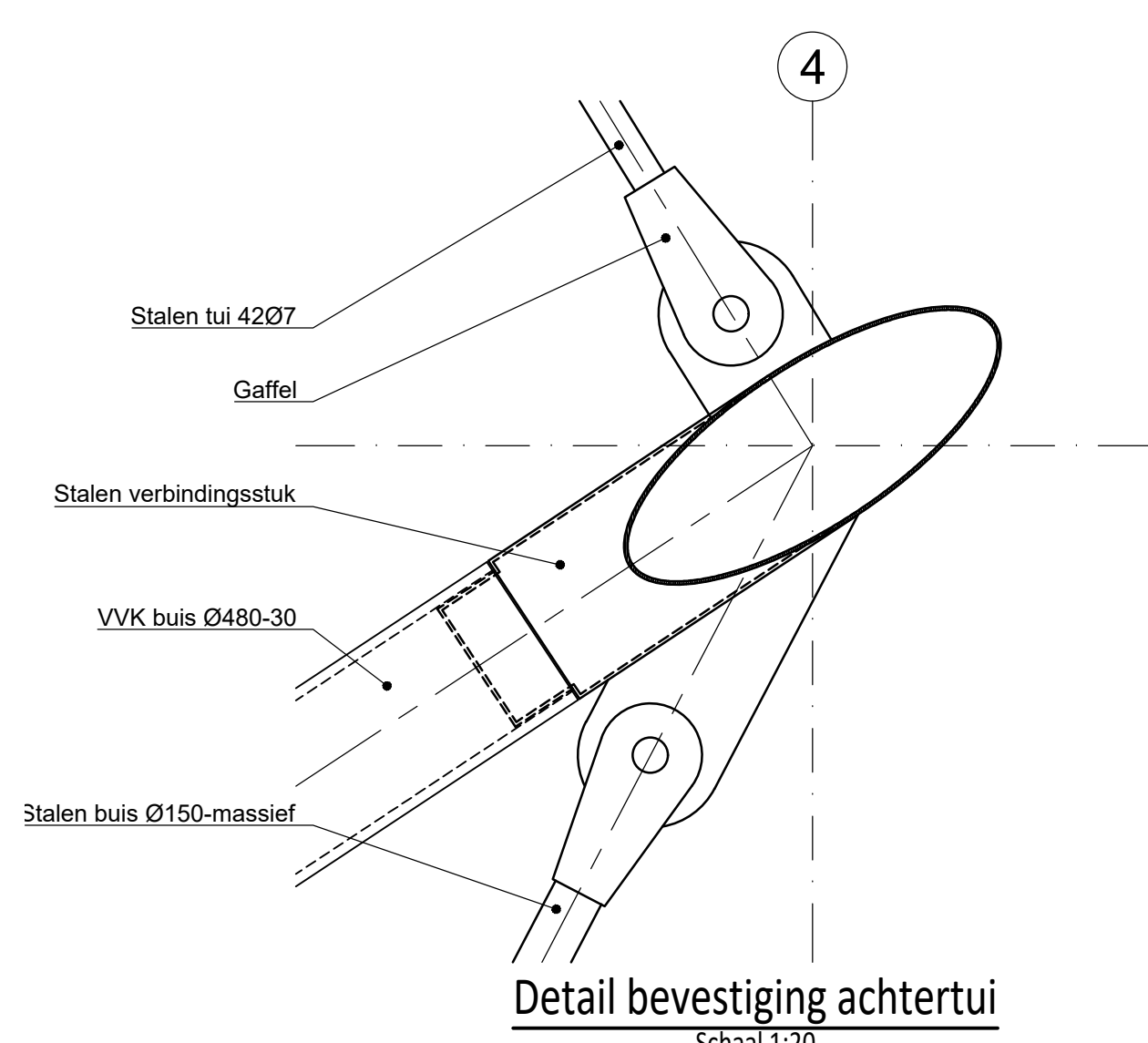
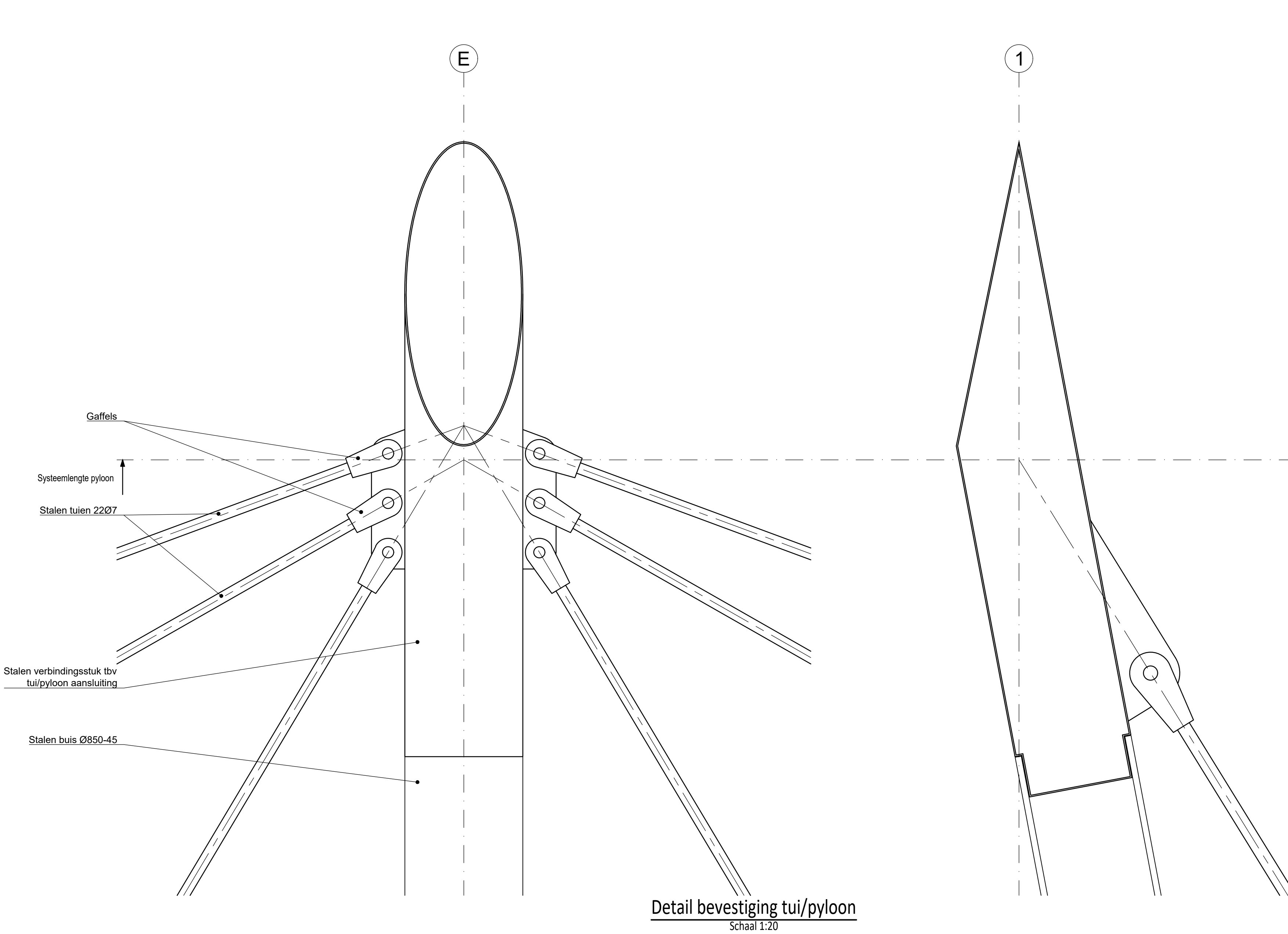
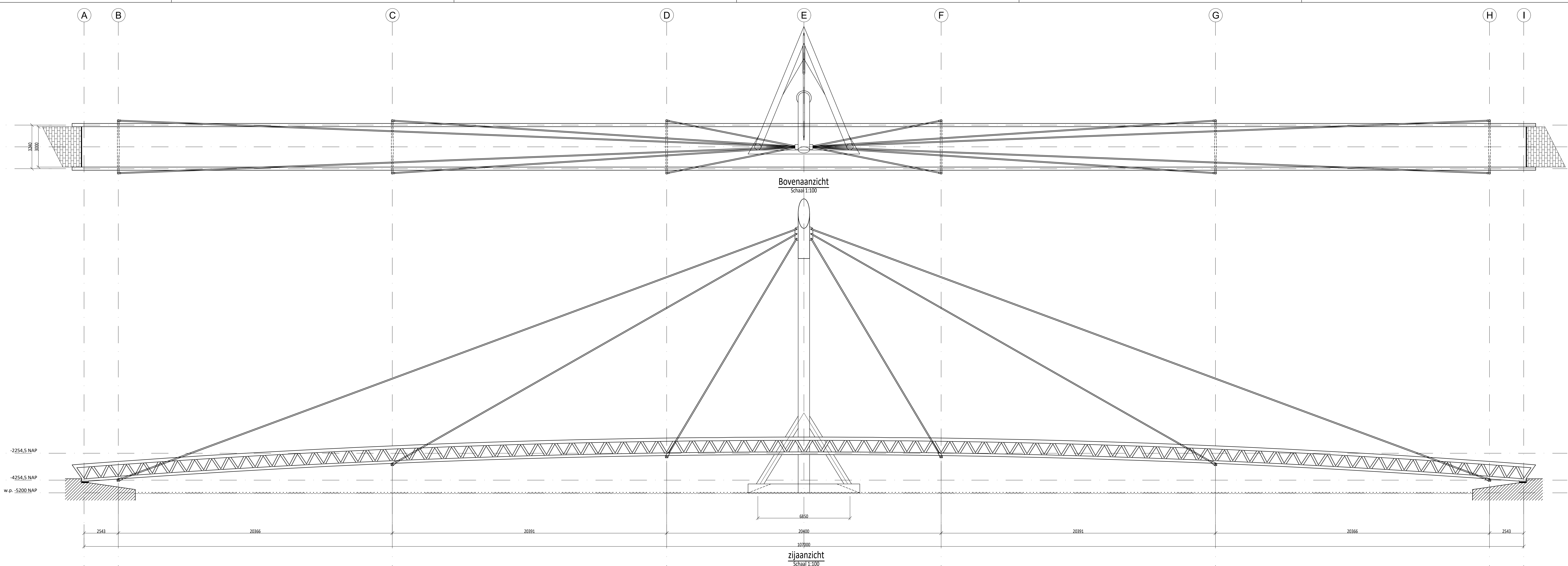


Gemeente Rotterdam



Bijlage BV.B – rekenmodel rapport 2D vakwerk

Bijlage BV.C – rekenmodel rapport 3D pyloon



Opmerkingen

- Alle maten zijn in mm
- De getekende details zijn *principedetails*

Legenda

- VVK
- Staal

Project
VVK in tuibruggen

Opdrachtgever
Gemeente Rotterdam

Onderdeel
Aanbeveling tekening

Getekend
L. Kraaijenbrink

Datum
13-06-2017

Schaal
zie tek.

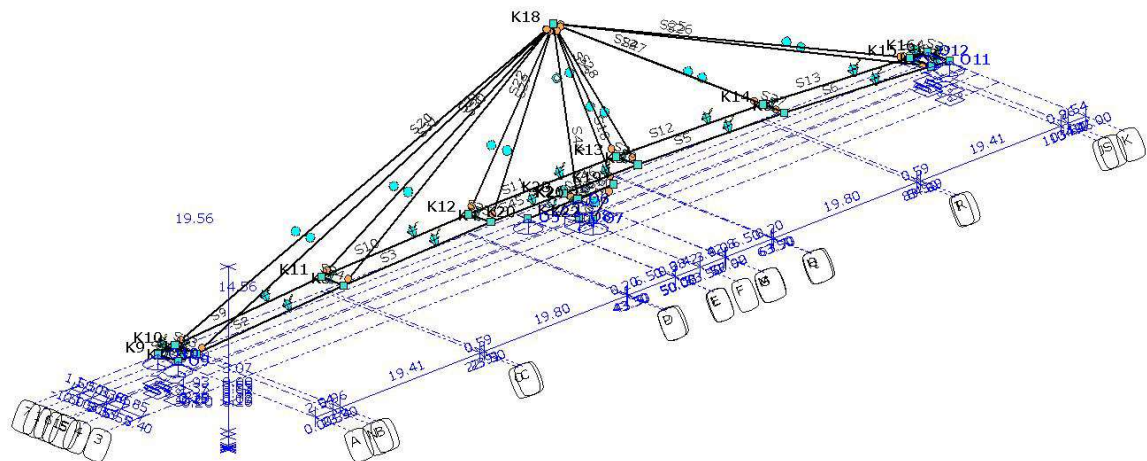
Formaat
A0

Bladnummer
1/1

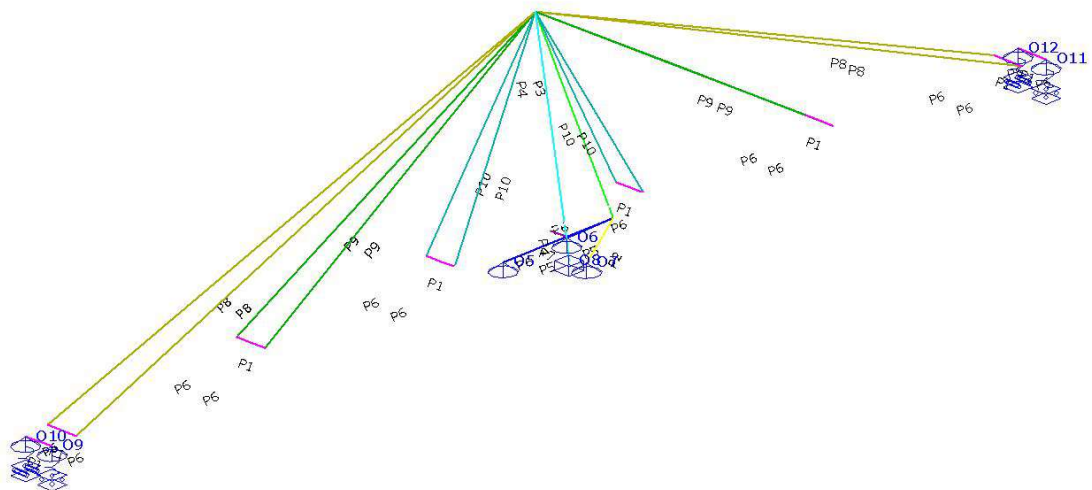
HOGESCHOOL ROTTERDAM

Projectnaam	Ringvaartplasbrug bestaande situatie 3D	Projectnummer	
Omschrijving	rapport bestaande situatie 3D	Constructeur	Lennart Kraaijenbrink
Opdrachtgever	0884858	Eenheden	m, kN, kNm
Bestand	C:\Users\Lennart\Downloads\ringvaartplas brug 3D bestand.mxe		

AFB. GEOMETRIE RAAMWERK



AFB. GEOMETRIE 2 STAVEN EN KNOPEN



STAVEN

Staaf	Knoop	Scharnier		Knoop	Profiel	X-B	Y-B	Z-B	X-E	Y-E	Z-E	Lengte
	B	B	E	E								
S1	K1	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K2	P6	0,000	1,500	0,000	2,543	1,500	-0,186	2,550
S2	K2	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K3	P6	2,543	1,500	-0,186	22,909	1,500	-1,347	20,399
S3	K3	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K4	P6	22,909	1,500	-1,347	43,300	1,500	-1,927	20,399

--	--	--

Staaf	Knoop	Scharnier		Knoop	Profiel	X-B	Y-B	Z-B	X-E	Y-E	Z-E	Lengte
	B	B	E	E								
S5	K5	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K6	P6	63,700	1,500	-1,927	84,091	1,500	-1,347	20,399
S6	K6	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K7	P6	84,091	1,500	-1,347	104,457	1,500	-0,186	20,399
S7	K7	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K8	P6	104,457	1,500	-0,186	107,000	1,500	0,000	2,550
S8	K9	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K10	P6	0,000	-1,500	0,000	2,543	-1,500	-0,186	2,550
S9	K10	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K11	P6	2,543	-1,500	-0,186	22,909	-1,500	-1,347	20,399
S10	K11	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K12	P6	22,909	-1,500	-1,347	43,300	-1,500	-1,927	20,399
S11	K12	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K13	P6	43,300	-1,500	-1,927	63,700	-1,500	-1,927	20,400
S12	K13	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K14	P6	63,700	-1,500	-1,927	84,091	-1,500	-1,347	20,399
S13	K14	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K15	P6	84,091	-1,500	-1,347	104,457	-1,500	-0,186	20,399
S14	K15	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K16	P6	104,457	-1,500	-0,186	107,000	-1,500	0,000	2,550
S16	K19	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K20	P5	53,500	8,403	-5,000	50,075	0,000	0,200	10,459
S17	K19	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K21	P5	53,500	8,403	-5,000	56,925	0,000	0,200	10,459
S18	K19	XYZXr--	XYZXr--	K18	P3	53,500	8,403	-5,000	53,500	0,000	-19,557	16,808
S19	K19	XYZXr--	XYZXrYrZr	K22	P2	53,500	8,403	-5,000	53,500	5,553	-0,388	5,422
S20	K18	XYZXr--	XYZXr--	K10	P8	53,500	0,000	-19,557	2,543	-1,500	-0,186	54,535
S21	K18	XYZXr--	XYZXr--	K11	P9	53,500	0,000	-19,557	22,909	-1,500	-1,347	35,632
S22	K18	XYZXr--	XYZXr--	K12	P10	53,500	0,000	-19,557	43,300	-1,500	-1,927	20,423
S23	K18	XYZXr--	XYZXr--	K13	P10	53,500	0,000	-19,557	63,700	-1,500	-1,927	20,423
S24	K18	XYZXr--	XYZXr--	K14	P9	53,500	0,000	-19,557	84,091	-1,500	-1,347	35,632
S25	K18	XYZXr--	XYZXr--	K15	P8	53,500	0,000	-19,557	104,457	-1,500	-0,186	54,535
S26	K18	XYZXr--	XYZXr--	K7	P8	53,500	0,000	-19,557	104,457	1,500	-0,186	54,535
S27	K18	XYZXr--	XYZXr--	K6	P9	53,500	0,000	-19,557	84,091	1,500	-1,347	35,632
S28	K18	XYZXr--	XYZXr--	K5	P10	53,500	0,000	-19,557	63,700	1,500	-1,927	20,423
S29	K18	XYZXr--	XYZXr--	K4	P10	53,500	0,000	-19,557	43,300	1,500	-1,927	20,423
S30	K18	XYZXr--	XYZXr--	K3	P9	53,500	0,000	-19,557	22,909	1,500	-1,347	35,632
S31	K18	XYZXr--	XYZXr--	K2	P8	53,500	0,000	-19,557	2,543	1,500	-0,186	54,535
S32	K9	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K1	P1	0,000	-1,500	0,000	0,000	1,500	0,000	3,000
S33	K10	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K2	P1	2,543	-1,500	-0,186	2,543	1,500	-0,186	3,000
S34	K11	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K3	P1	22,909	-1,500	-1,347	22,909	1,500	-1,347	3,000
S35	K12	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K4	P1	43,300	-1,500	-1,927	43,300	1,500	-1,927	3,000
S36	K13	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K5	P1	63,700	-1,500	-1,927	63,700	1,500	-1,927	3,000
S37	K14	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K6	P1	84,091	-1,500	-1,347	84,091	1,500	-1,347	3,000
S38	K15	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K7	P1	104,457	-1,500	-0,186	104,457	1,500	-0,186	3,000
S39	K16	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K8	P1	107,000	-1,500	0,000	107,000	1,500	0,000	3,000
S42	K26	XYZXr--	XYZXr--	K23	P7	53,500	3,328	-1,927	53,500	1,500	-1,927	1,828
S43	K17	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K26	P4	53,500	3,692	0,000	53,500	3,328	-1,927	1,961
S44	K26	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K18	P4	53,500	3,328	-1,927	53,500	0,000	-19,557	17,941
S45	K4	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K23	P6	43,300	1,500	-1,927	53,500	1,500	-1,927	10,200
S46	K23	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K5	P6	53,500	1,500	-1,927	63,700	1,500	-1,927	10,200
-	-	-	-	-	-	m	m	m	m	m	m	m

PROFIELEN

Profiel	Profielnaam	Oppervlakte	It	ly	Iz Materiaal	Hoek
P1	HE1000M	4.4421e-02	1.7013e-05	7.2230e-03	1.8459e-04 S235	0
P2	C150	1.7671e-02	4.9701e-05	2.4850e-05	2.4850e-05 S355	0
P3	C45	1.5904e-03	4.0258e-07	2.0129e-07	2.0129e-07 tuien tpv dek	0
P4	B711x20	4.3417e-02	5.1870e-03	2.5935e-03	2.5935e-03 S355	0
P5	B273x16	1.2918e-02	2.1414e-04	1.0707e-04	1.0707e-04 S355	0
P6	Stalen troglijger	2.3910e-02	1.8410e-04	3.9267e-02	5.1523e-03 S355	0
P7	C30	7.0686e-04	7.9522e-08	3.9761e-08	3.9761e-08 S235	0
P8	C32.8	8.4496e-04	1.1363e-07	5.6815e-08	5.6815e-08 Tui 1 oude	0
P9	C32.8	8.4496e-04	1.1363e-07	5.6815e-08	5.6815e-08 Tui 2 oude	0
P10	C32.8	8.4496e-04	1.1363e-07	5.6815e-08	5.6815e-08 Tui 3 oude	0
-	-	m2	m4	m4	m4 -	°

PROFIELVORMEN

Profiel	Verl. h.	hB	hE	tf	tw	tf2	B	bL	bR Raatl.	Hoogte
P2	Nee	0.150	0.150	0.000	0.000	0.000	0.150	0.000	0.000 Nee	0.000
P3	Nee	0.045	0.045	0.000	0.000	0.000	0.045	0.000	0.000 Nee	0.000
P4	Nee	0.711	0.711	0.000	0.020	0.000	0.711	0.000	0.000 Nee	0.000
P5	Nee	0.273	0.273	0.000	0.016	0.000	0.273	0.000	0.000 Nee	0.000
P7	Nee	0.030	0.030	0.000	0.000	0.000	0.030	0.000	0.000 Nee	0.000
P8	Nee	0.033	0.033	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000 Nee	0.000
P9	Nee	0.033	0.033	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000 Nee	0.000

--	--	--

Profiel	Verl. h.	hB	hE	tf	tw	tf2	B	bL	bR Raatl.	Hoogte
P10	Nee	0.033	0.033	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000 Nee	0.000
-	-	m	m	m	m	m	m	m	m -	m

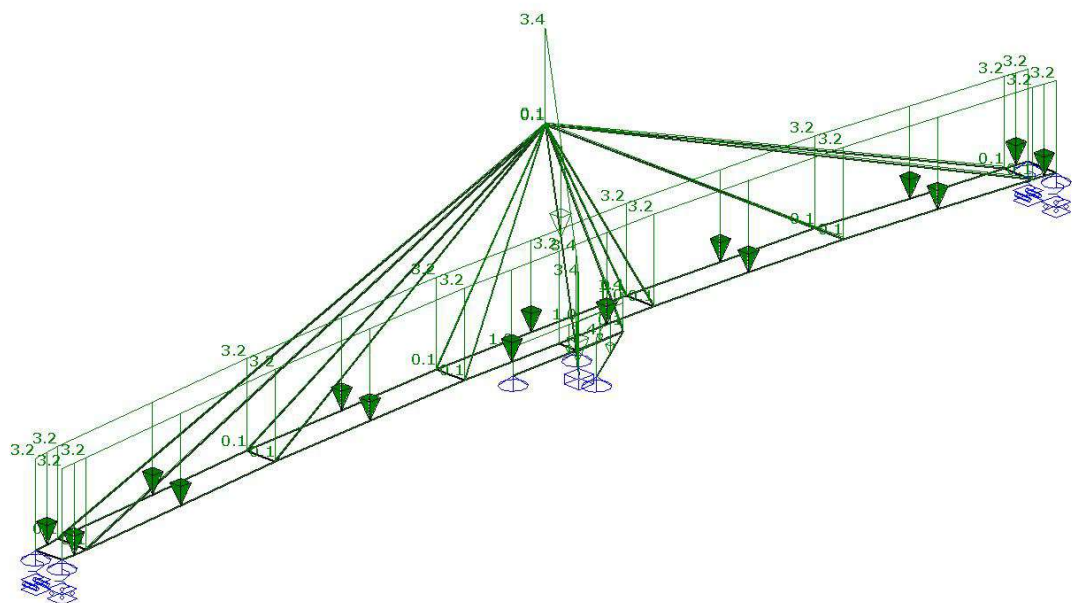
MATERIALEN

Materiaalnaam	Poison	Dichtheid	E-Modulus	Uitzettingcoeff
S355	0.30	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
S235	0.30	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
tuien tpv dek	0.30	78.50	2.0000e+08	12.0000e-06
Tui 1 oude	0.30	78.50	2.0127e+08	12.0000e-06
Tui 2 oude	0.30	78.50	1.9952e+08	12.0000e-06
Tui 3 oude	0.30	78.50	1.8407e+08	12.0000e-06
-	-	kN/m3	kN/m2	C°m

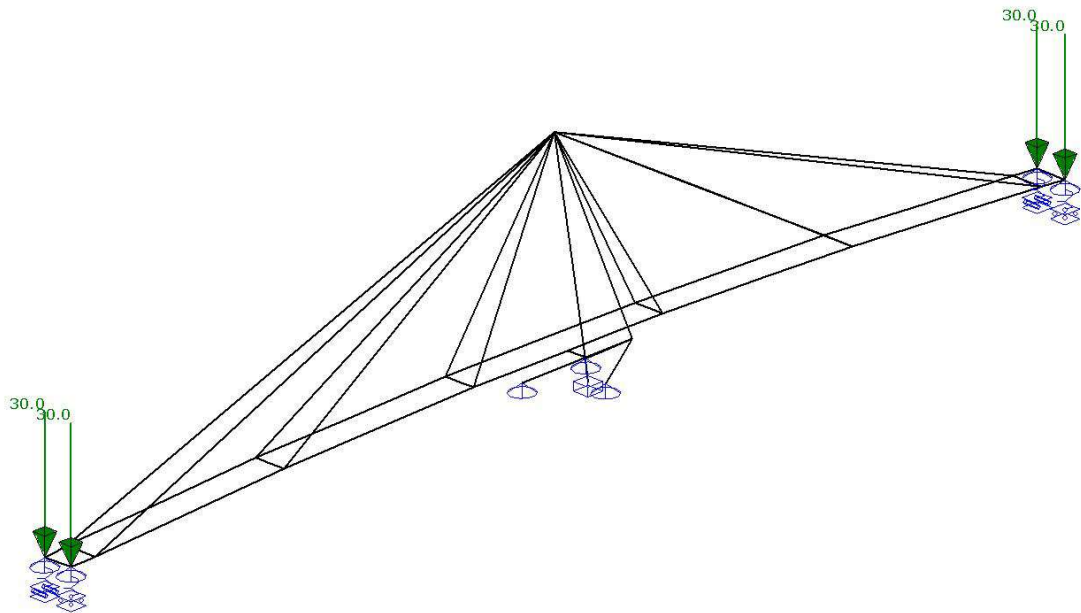
OPLEGGINGEN

Oplegging	Knopen	X	Y	Z	Xr	Yr	Zr	HoekXr	HoekYr	HoekZr
O5	K20	vast	vast	vast	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O6	K21	vast	vast	vast	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O7	K22	vast	vast	vast	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O8	K17	vast	vast	vast	vast	vast	vast	0	0	0
O9	K1	vrij	vrij	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O10	K9	vrij	vast	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O11	K8	vrij	vrij	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O12	K16	vrij	vast	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
-	-	kN/m	kN/m	kN/m	kNmrad	kNmrad	kNmrad	°	°	°

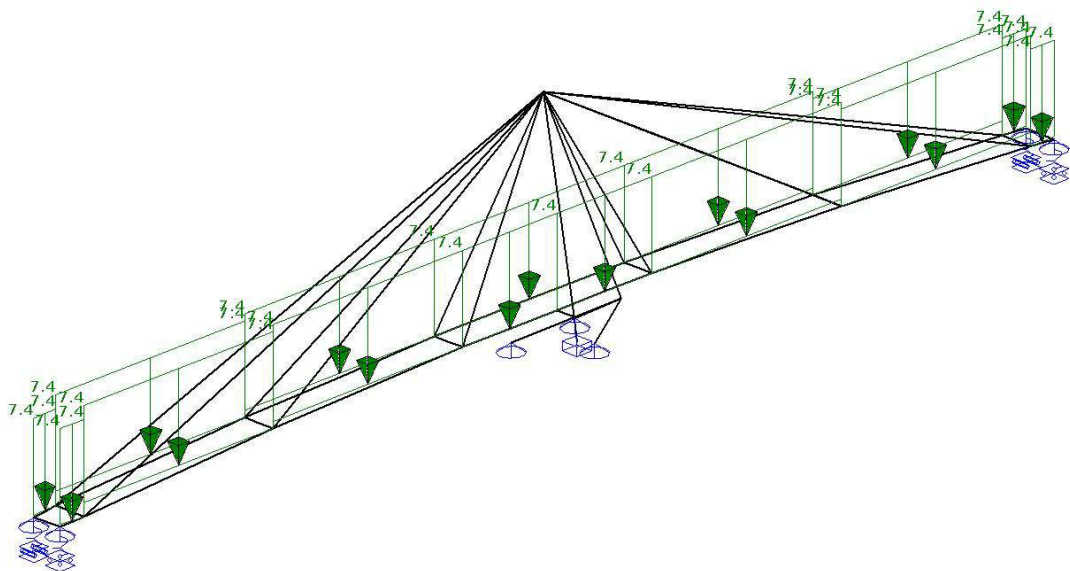
AFB. LASTEN B.G.1 EIGEN GEWICHT BGT



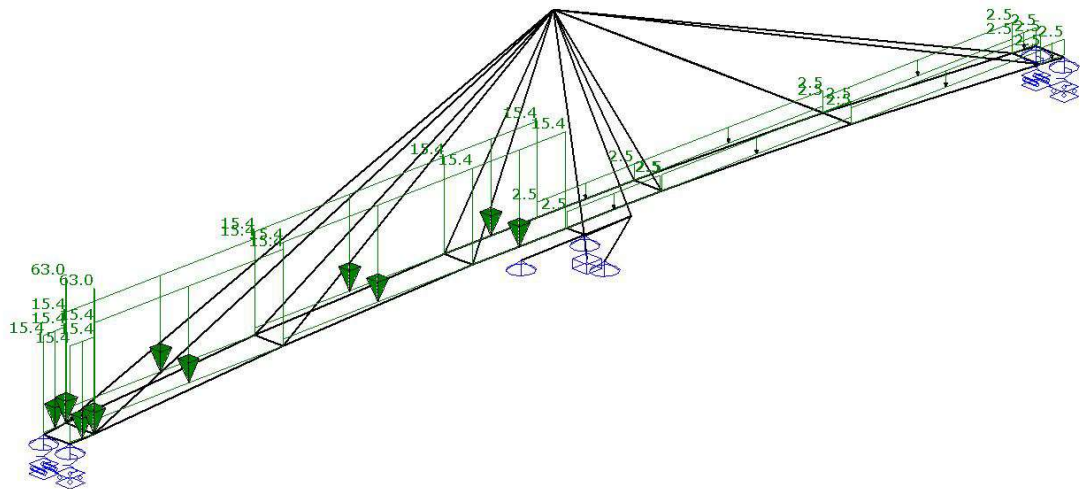
AFB. LASTEN B.G.2 VOORSPANNING LANDHOOFDEN BGT



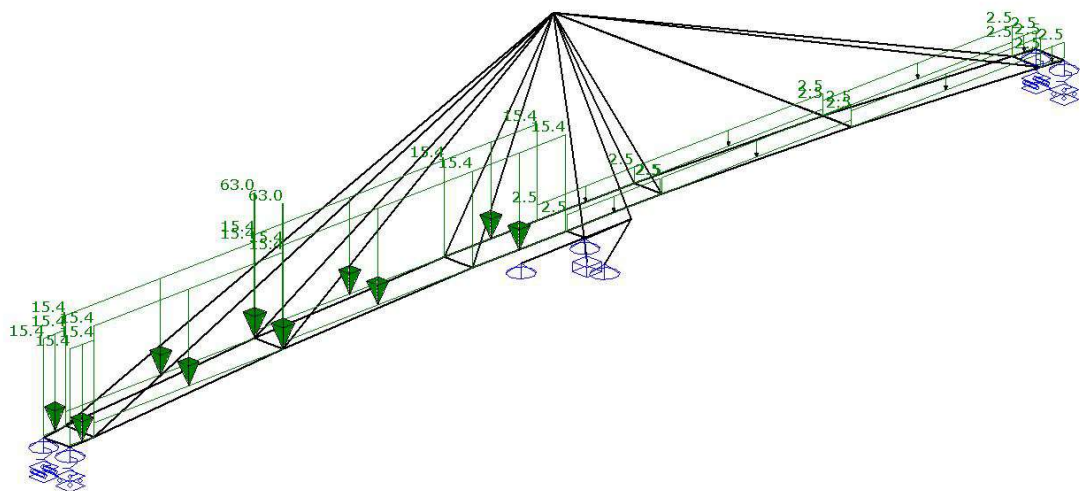
AFB. LASTEN B.G.3 GEHELE DEK BELAST BGT



AFB. LASTEN B.G.4 1/2 DEK BELAST + STROOIWAGEN TUI 1 UGT

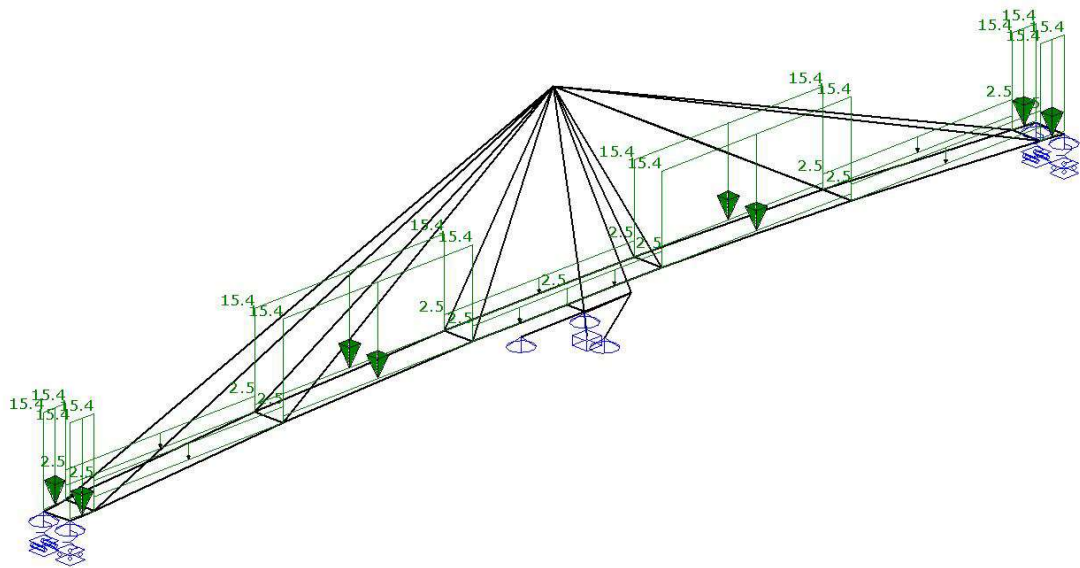


AFB. LASTEN B.G.5 1/2 DEK BELAST + STROOIWAGEN TUI 2 UGT

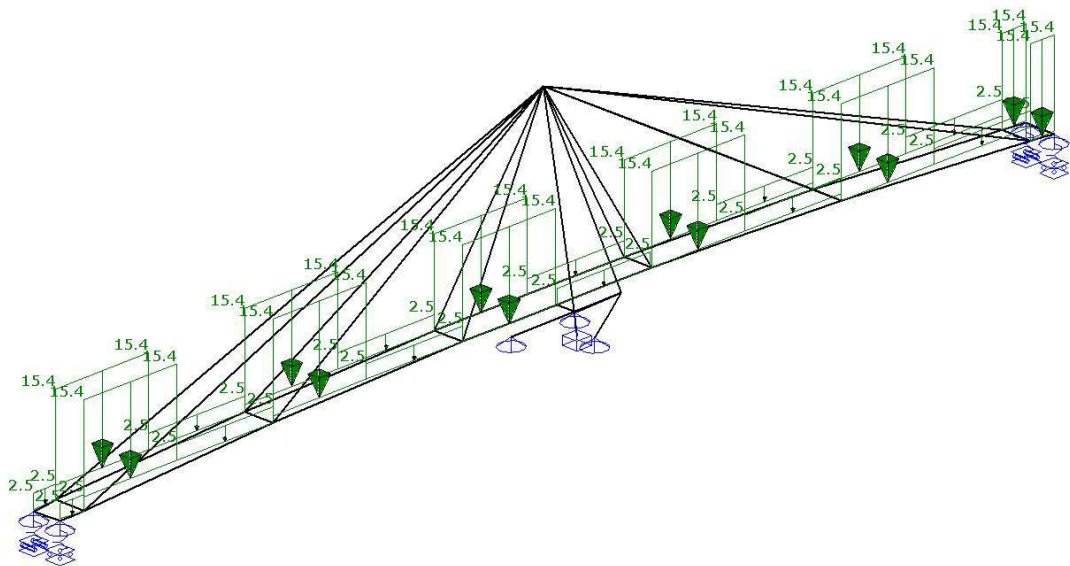




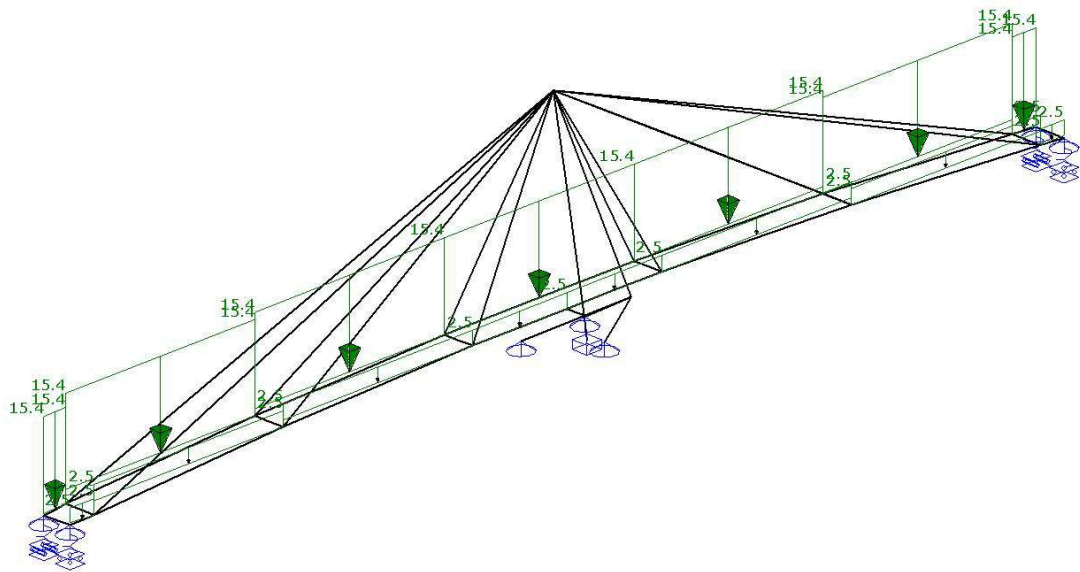
AFB. LASTEN B.G.8 SCHAAKBORD 2 UGT



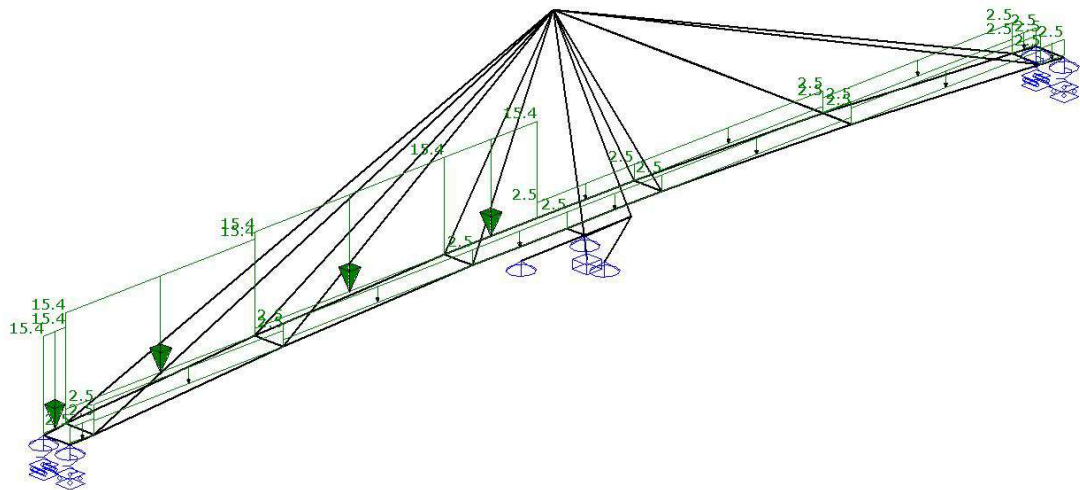
AFB. LASTEN B.G.9 SCHAAKBORD 3 UGT



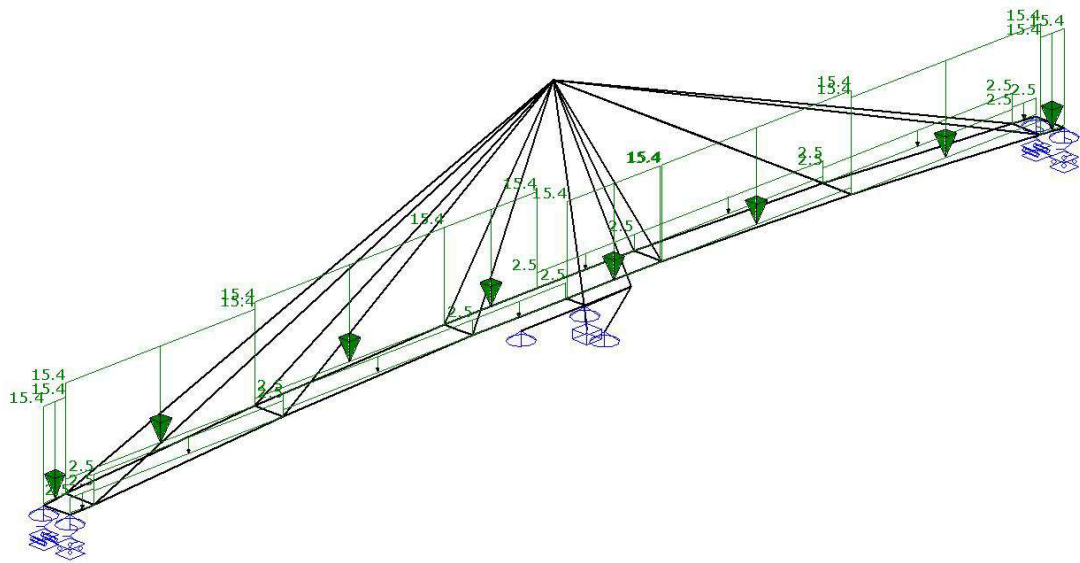
AFB. LASTEN B.G.10 1/2 DEK IN LANGSRICHTING BELAST UGT



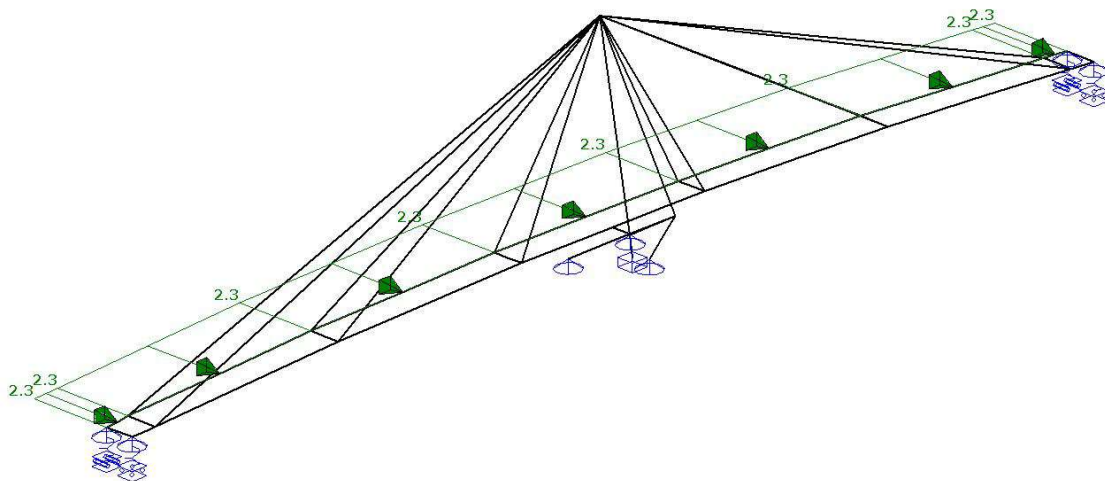
AFB. LASTEN B.G.11 1/4 DEK IN LANGSRICHTING BELAST UGT



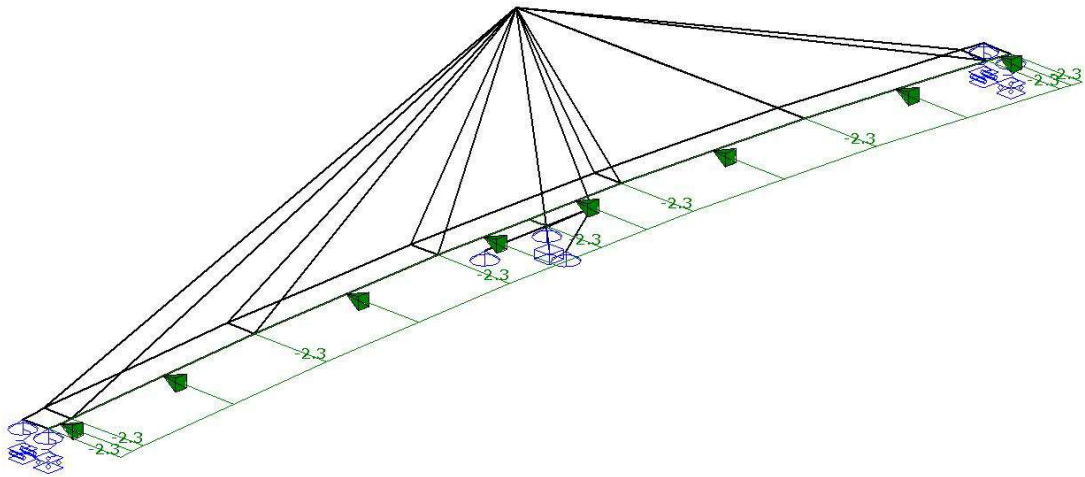
AFB. LASTEN B.G.12 SCHAAKBORD 4 UGT



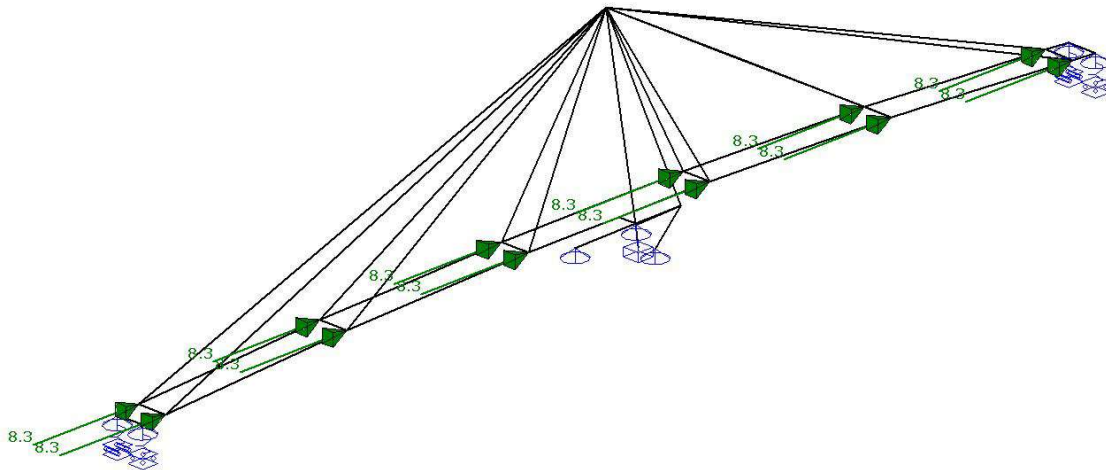
AFB. LASTEN B.G.13 WIND VAN VOOR UGT



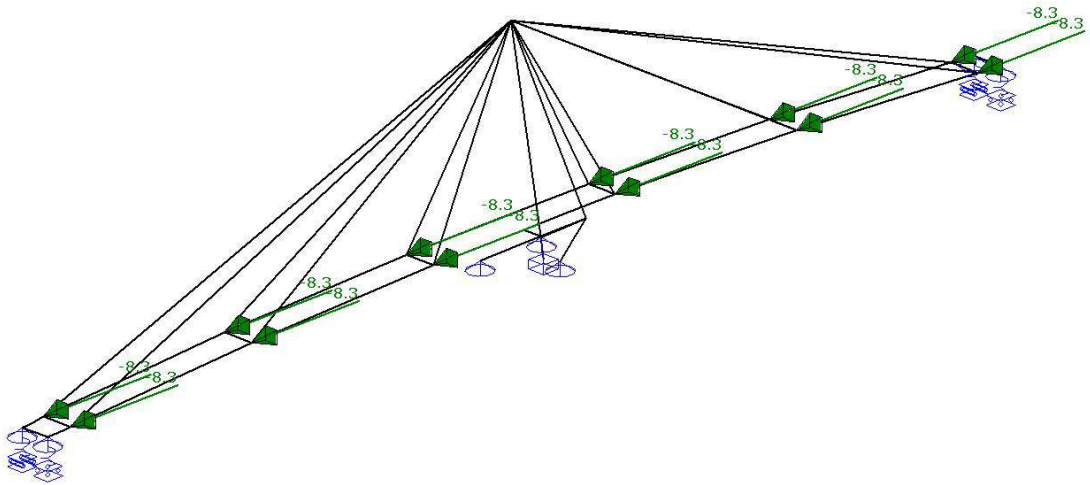
AFB. LASTEN B.G.14 WIND VAN ACHTER UGT



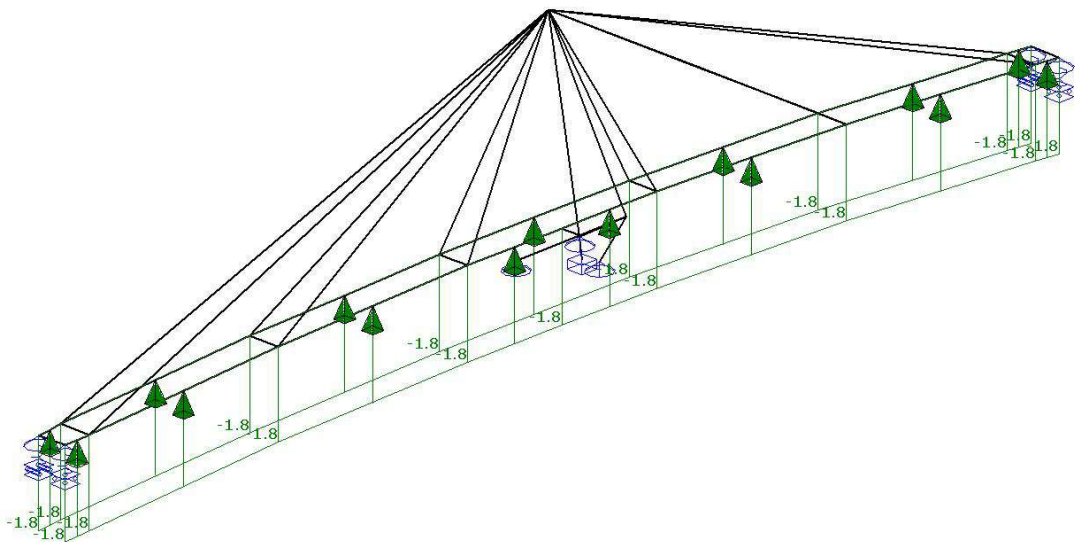
AFB. LASTEN B.G.15 WIND VAN LINKS UGT



AFB. LASTEN B.G.16 WIND VAN RECHTS UGT



AFB. LASTEN B.G.17 WINDZUIGING UGT







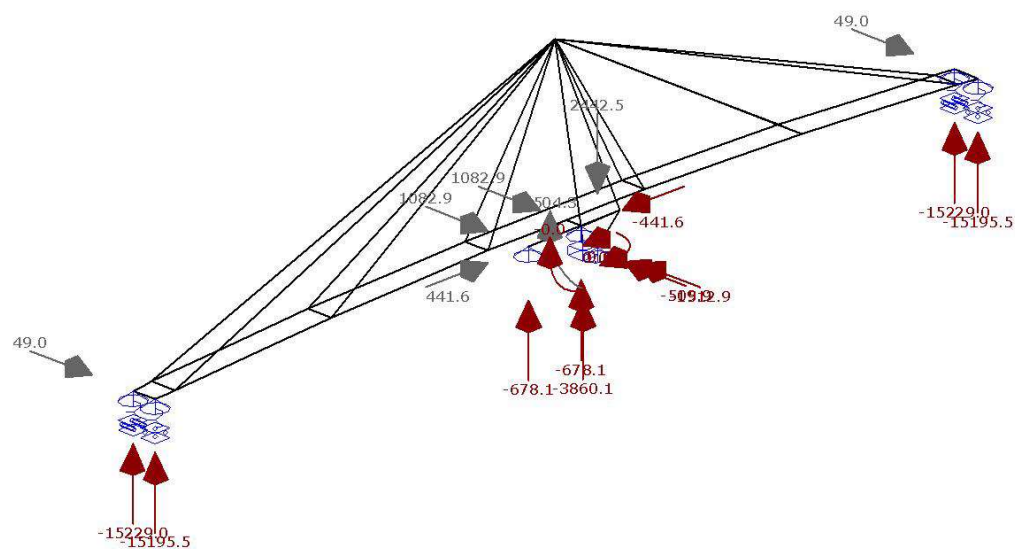
15

15

B.G.3	gehele dek belast BGT	1.50
B.G.4	1/2 dek belast + strooiwagen tui 1 UGT	-
B.G.5	1/2 dek belast + strooiwagen tui 2 UGT	-
B.G.6	1/2 dek belast + strooiwagen tui 3 UGT	-
B.G.7	Schaakbord 1 UGT	-
B.G.8	Schaakbord 2 UGT	-
B.G.9	Schaakbord 3 UGT	-
B.G.10	1/2 dek in langsrichting belast UGT	-
B.G.11	1/4 dek in langsrichting belast UGT	-
B.G.12	Schaakbord 4 UGT	-
B.G.13	Wind van voor UGT	-
B.G.14	Wind van achter UGT	1.00
B.G.15	Wind van links UGT	-
B.G.16	Wind van rechts UGT	-
B.G.17	Windzuiging UGT	-
B.G.18	Wagen klasse 30 stand 1 UGT	-
B.G.19	Wagen klasse 30 stand 2a UGT	-
B.G.20	Wagen klasse 30 stand 2b UGT	-
B.G.21	Wagen klasse 30 stand 3a UGT	-
B.G.22	Wagen klasse 30 stand 3b UGT	-
B.G.23	Zettingen pyloon	1.00
B.G.24	Zettingen landhoofden	-
B.G.25	temperatuur	1.00

AFB. FU.C.1 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



FU.C. STAAFKRACHTEN (MY, MZ)

Staaf	B.C.	Waarde	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0
S1	Fu.C.1	My	0.70			458.88	0.000	0.000
		Mz	56.89			19.32	0.000	0.000
S2	Fu.C.1	My	459.58	1950.69	13.660	1587.70	0.000	0.000
		Mz	81.97	-121.71	13.455	-67.47	3.054	0.000
S3	Fu.C.1	My	1588.18	1635.48	2.430	-950.21	16.721	0.000
		Mz	-94.72	-153.66	7.238	41.20	18.925	0.000
S5	Fu.C.1	My	-950.21	1635.48	17.969	1588.18	3.678	0.000
		Mz	41.20	-153.66	13.161	-94.72	1.474	0.000
S6	Fu.C.1	My	1587.70	1950.69	6.740	459.58	0.000	0.000
		Mz	-67.47	-121.71	6.944	81.97	17.345	0.000
S7	Fu.C.1	My	458.88			0.70	0.000	0.000

--	--	--

Staaf	B.C.	Waarde	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0
S8	Fu.C.1	Mz	19.32			56.89	0.000	0.000
		My	-0.70			517.10	0.003	0.000
		Mz	57.25			-22.69	1.826	0.000
S9	Fu.C.1	My	516.41	2190.04	14.471	1909.23	0.000	0.000
		Mz	39.17			-205.76	3.262	0.000
S10	Fu.C.1	My	1908.75	1949.66	2.260	-685.25	17.863	0.000
		Mz	-239.80			182.98	11.570	0.000
S11	Fu.C.1	My	-685.40	148.35	10.200	-685.40	5.897	14.503
		Mz	87.53			87.53	0.000	0.000
S12	Fu.C.1	My	-685.25	1949.66	18.139	1908.75	2.536	0.000
		Mz	182.98			-239.80	8.829	0.000
S13	Fu.C.1	My	1909.23	2190.04	5.928	516.41	0.000	0.000
		Mz	-205.76			39.17	17.137	0.000
S14	Fu.C.1	My	517.10			-0.70	2.547	0.000
		Mz	-22.69			57.25	0.724	0.000
S16	Fu.C.1	My	0.49	-17.80	5.265	0.00	0.071	0.000
		Mz	2.42			0.00	0.000	0.000
S17	Fu.C.1	My	-0.49	17.80	5.265	0.00	0.071	0.000
		Mz	2.42			0.00	0.000	0.000
S18	Fu.C.1	My	0.00	3.31	8.404	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S19	Fu.C.1	My	0.00	4.02	2.711	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S20	Fu.C.1	My	0.00	-34.58	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S21	Fu.C.1	My	0.00	-13.57	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S22	Fu.C.1	My	0.00	-2.62	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S23	Fu.C.1	My	0.00	2.62	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S24	Fu.C.1	My	0.00	13.57	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S25	Fu.C.1	My	0.00	34.58	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S26	Fu.C.1	My	0.00	34.58	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S27	Fu.C.1	My	0.00	13.57	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S28	Fu.C.1	My	0.00	2.62	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S29	Fu.C.1	My	0.00	-2.62	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S30	Fu.C.1	My	0.00	-13.57	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S31	Fu.C.1	My	0.00	-34.58	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S32	Fu.C.1	My	-11.68			11.63	1.503	0.000
		Mz	-56.55			56.19	1.505	0.000
S33	Fu.C.1	My	-3.07			2.45	1.668	0.000
		Mz	-61.90			62.73	1.490	0.000
S34	Fu.C.1	My	-1.57			-2.13	0.000	0.000
		Mz	33.99			-27.04	1.671	0.000
S35	Fu.C.1	My	8.56			-4.57	1.956	0.000
		Mz	95.29			-125.57	1.294	0.000
S36	Fu.C.1	My	8.56			-4.57	1.956	0.000
		Mz	-95.29			125.57	1.294	0.000
S37	Fu.C.1	My	-1.57			-2.13	0.000	0.000
		Mz	-33.99			27.04	1.671	0.000
S38	Fu.C.1	My	-3.07			2.45	1.668	0.000
		Mz	61.90			-62.73	1.490	0.000
S39	Fu.C.1	My	-11.68			11.63	1.503	0.000
		Mz	56.55			-56.19	1.505	0.000
S42	Fu.C.1	My	0.00			0.00	0.000	0.000

--	--	--

Staaf	B.C.	Waarde	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S43	Fu.C.1	My	-1504.33			-1082.23	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S44	Fu.C.1	My	-1082.23			0.02	17.941	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S45	Fu.C.1	My	-950.06			-116.31	0.000	0.000
		Mz	-84.48			547.14	1.616	0.000
S46	Fu.C.1	My	-116.31			-950.06	0.000	0.000
		Mz	547.14			-84.48	8.584	0.000
-	-	-	kNm	kNm	m	kNm	m	m

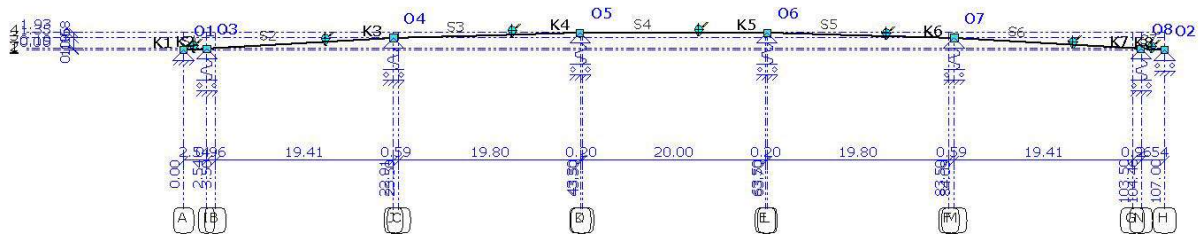
FU.C. STAAFKRACHTEN (NX, VY, VZ, MX)

Staaf	B.C.	T/D	Nmax	Waarde	Vb	Vmax	Ve	Mxb	Mxe
S1	Fu.C.1	D	-52.31	Vz	200.03	200.03	159.35	-7.50	-7.50
				Vy	-17.60	-17.60	-11.87		
S2	Fu.C.1	D	-282.44	Vz	218.33	218.33	-107.72	-6.69	-6.69
				Vy	-30.27	-30.27	15.62		
S3	Fu.C.1	D	-498.43	Vz	38.93	-287.80	-287.80	-3.40	-3.40
				Vy	-16.29	29.61	29.61		
S5	Fu.C.1	D	-498.43	Vz	287.80	287.80	-38.93	3.40	3.40
				Vy	-29.61	-29.61	16.29		
S6	Fu.C.1	D	-282.44	Vz	107.72	-218.33	-218.33	6.69	6.69
				Vy	-15.62	30.27	30.27		
S7	Fu.C.1	D	-52.31	Vz	-159.35	-200.03	-200.03	7.50	7.50
				Vy	11.87	17.60	17.60		
S8	Fu.C.1	T	24.31	Vz	223.42	223.42	182.73	-7.52	-7.52
				Vy	-31.35	-31.35	-31.35		
S9	Fu.C.1	D	-92.79	Vz	231.30	231.30	-94.74	-6.70	-6.70
				Vy	-12.01	-12.01	-12.01		
S10	Fu.C.1	D	-332.11	Vz	36.20	-290.52	-290.52	-3.36	-3.36
				Vy	20.73	20.73	20.73		
S11	Fu.C.1	D	-659.91	Vz	163.48	-163.48	-163.48	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S12	Fu.C.1	D	-332.11	Vz	290.52	290.52	-36.20	3.36	3.36
				Vy	-20.73	-20.73	-20.73		
S13	Fu.C.1	D	-92.79	Vz	94.74	-231.30	-231.30	6.70	6.70
				Vy	12.01	12.01	12.01		
S14	Fu.C.1	T	24.31	Vz	-182.73	-223.42	-223.42	7.52	7.52
				Vy	31.35	31.35	31.35		
S16	Fu.C.1	D	-1351.81	Vz	-6.95	-6.95	6.85	0.00	0.00
				Vy	-0.23	-0.23	-0.23		
S17	Fu.C.1	D	-1351.81	Vz	6.95	6.95	-6.85	0.00	0.00
				Vy	-0.23	-0.23	-0.23		
S18	Fu.C.1	T	1307.35	Vz	0.79	-0.79	-0.79	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S19	Fu.C.1	T	2882.70	Vz	2.97	2.97	-2.97	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S20	Fu.C.1	T	170.70	Vz	-2.54	-2.54	2.54	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S21	Fu.C.1	T	270.12	Vz	-1.52	-1.52	1.52	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S22	Fu.C.1	T	512.15	Vz	-0.51	0.51	0.51	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S23	Fu.C.1	T	512.15	Vz	0.51	-0.51	-0.51	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S24	Fu.C.1	T	270.12	Vz	1.52	1.52	-1.52	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S25	Fu.C.1	T	170.70	Vz	2.54	2.54	-2.54	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S26	Fu.C.1	T	204.77	Vz	2.54	2.54	-2.54	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S27	Fu.C.1	T	289.66	Vz	1.52	1.52	-1.52	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S28	Fu.C.1	T	513.66	Vz	0.51	-0.51	-0.51	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S29	Fu.C.1	T	513.66	Vz	-0.51	0.51	0.51	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		

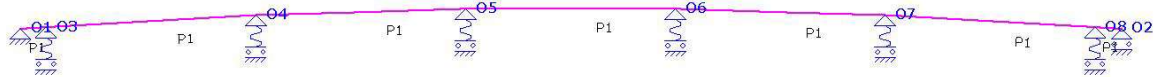
Staat	B.C.	T/D	Nmax Waarde	Vb	Vmax	Ve	Mxb	Mxe
S30	Fu.C.1	T	289.66 Vz	-1.52	-1.52	1.52	0.00	0.00
			Vy	0.00	0.00	0.00		
S31	Fu.C.1	T	204.77 Vz	-2.54	-2.54	2.54	0.00	0.00
			Vy	0.00	0.00	0.00		
S32	Fu.C.1	D	-17.60 Vz	7.77	7.77	7.77	0.70	0.70
			Vy	37.58	37.58	37.58		
S33	Fu.C.1	D	-24.01 Vz	1.84	1.84	1.84	0.70	0.70
			Vy	41.54	41.54	41.54		
S34	Fu.C.1	D	-44.07 Vz	-0.19	-0.19	-0.19	0.48	0.48
			Vy	-20.35	-20.35	-20.35		
S35	Fu.C.1	D	-16.83 Vz	-4.38	-4.38	-4.38	0.15	0.15
			Vy	-73.62	-73.62	-73.62		
S36	Fu.C.1	D	-16.83 Vz	-4.38	-4.38	-4.38	-0.15	-0.15
			Vy	73.62	73.62	73.62		
S37	Fu.C.1	D	-44.07 Vz	-0.19	-0.19	-0.19	-0.48	-0.48
			Vy	20.35	20.35	20.35		
S38	Fu.C.1	D	-24.01 Vz	1.84	1.84	1.84	-0.70	-0.70
			Vy	-41.54	-41.54	-41.54		
S39	Fu.C.1	D	-17.60 Vz	7.77	7.77	7.77	-0.70	-0.70
			Vy	-37.58	-37.58	-37.58		
S42	Fu.C.1	T	146.80 Vz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			Vy	0.00	0.00	0.00		
S43	Fu.C.1	D	-3887.58 Vz	216.16	216.16	214.30	0.00	0.00
			Vy	0.00	0.00	0.00		
S44	Fu.C.1	D	-3905.02 Vz	68.83	68.83	51.82	0.00	0.00
			Vy	0.00	0.00	0.00		
S45	Fu.C.1	D	-679.60 Vz	163.48	163.48	0.00	0.00	0.00
			Vy	50.45	73.40	73.40		
S46	Fu.C.1	D	-679.60 Vz	0.00	-163.48	-163.48	0.00	0.00
			Vy	-73.40	-73.40	-50.45		
-	-	-	kN -	kN	kN	kN	kNm	kNm

Projectnaam	Ringvaartplasbrug 2D bestaand	Projectnummer	
Omschrijving	Ringvaartplasbrug	Constructeur	Lennart Kraaijenbrink
Opdrachtgever	0884858	Eenheden	m, kN, kNm
Bestand	C:\Users\Lennart\Downloads\frequentie test 1.4 dek best.mxe		

AFB. GEOMETRIE RAAMWERK



AFB. GEOMETRIE 2 STAVEN EN KNOPEN



STAVEN

Staaf	Knoop B	Scharnier B	Knoop E	Profiel	X-B	Z-B	X-E	Z-E	Lengte
S1	K1	NVM	K2	P1	0,000	0,000	2,543	-0,186	2,550
S2	K2	NVM	K3	P1	2,543	-0,186	22,909	-1,347	20,399
S3	K3	NVM	K4	P1	22,909	-1,347	43,300	-1,927	20,399
S4	K4	NVM	K5	P1	43,300	-1,927	63,700	-1,927	20,400
S5	K5	NVM	K6	P1	63,700	-1,927	84,091	-1,347	20,399
S6	K6	NVM	K7	P1	84,091	-1,347	104,457	-0,186	20,399
S7	K7	NVM	K8	P1	104,457	-0,186	107,000	0,000	2,550
-	-	-	-	-	m	m	m	m	m

PROFIELEN

Profiel	Profielnaam	Oppervlakte	Iy Materiaal	Hoek
P1	Troglijger staal	2.3910e-02	5.1423e-03 S355	0
-	-	m2	m4 -	°

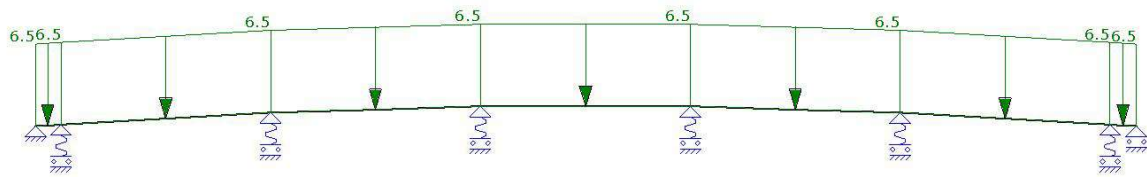
MATERIALEN

Materiaal	Dichtheid	E-Modulus	Uitzettingcoeff
S355	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
-	kN/m3	kN/m2	C°m

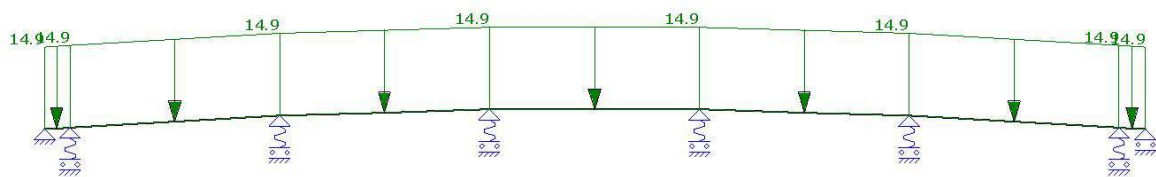
OPLEGGINGEN

Oplegging	Knoop	X	Z	Yr	HoekYr
O1	K1	vast	vast	vrij	0
O2	K8	vrij	vast	vrij	0
O3	K2	vrij	1110	vrij	0
O4	K3	vrij	2423	vrij	0
O5	K4	vrij	6587	vrij	0
O6	K5	vrij	6587	vrij	0
O7	K6	vrij	2423	vrij	0
O8	K7	vrij	1110	vrij	0
-	-	kN/m	kN/m	kNmrad	°

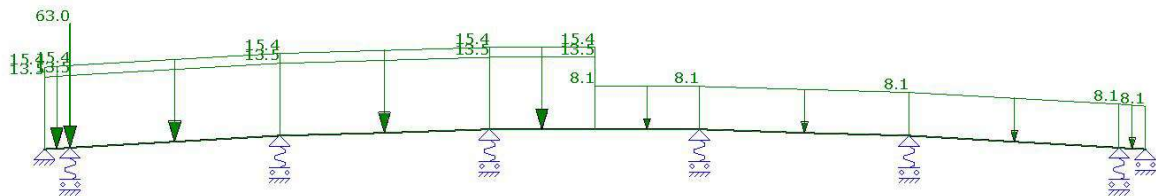
AFB. LASTEN B.G.1 EG BGT



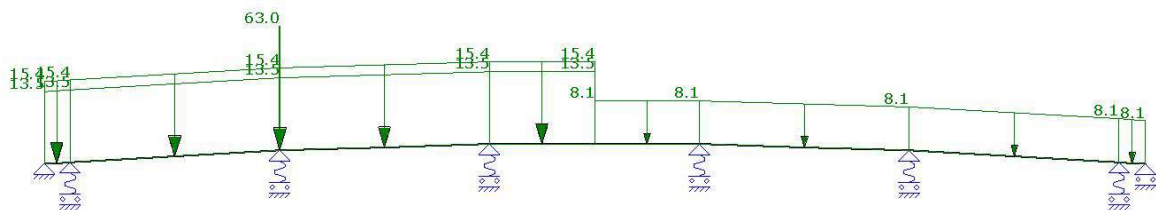
AFB. LASTEN B.G.2 VAR BGT



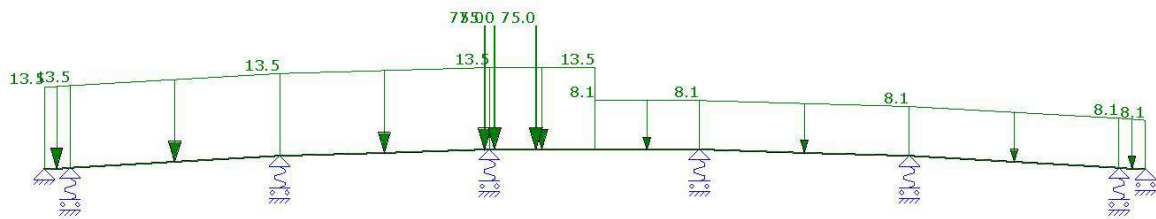
AFB. LASTEN B.G.3 1/2 DEK BELAST + STROOIWAGEN TUI 1 UGT



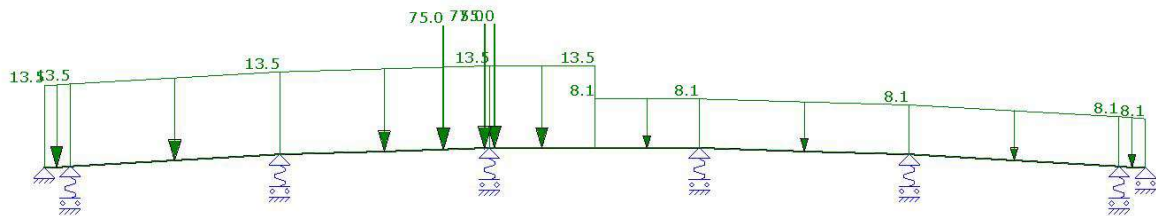
AFB. LASTEN B.G.4 1/2 DEK BELAST + STROOIWAGEN TUI 2 UGT



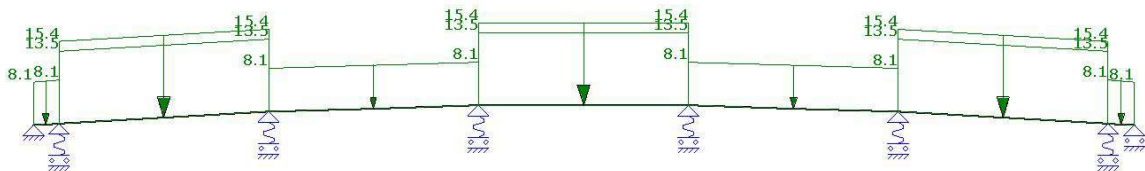
AFB. LASTEN B.G.9 WAGEN KLASSE 30 STAND 3A UGT



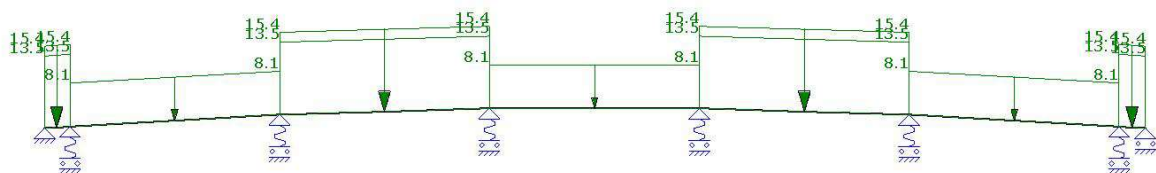
AFB. LASTEN B.G.10 WAGEN KLASSE 30 STAND 3B UGT



AFB. LASTEN B.G.11 SCHAARBORD 1 UGT



AFB. LASTEN B.G.12 SCHAARBORD 2 UGT



FUNDAMENTEEL BELASTINGSCOMBINATIES (TABEL)

B.G.	Omschrijving	Fu.C.1	Fu.C.2	Fu.C.3	Fu.C.4	Fu.C.5	Fu.C.6	Fu.C.7	Fu.C.8
B.G.1	eg BGT	1.50	1.50	-	-	-	-	-	-
B.G.2	var BGT	-	1.50	-	-	-	-	-	-
B.G.3	1/2 dek belast + strooiwagen tui 1 UGT	-	-	1.00	-	-	-	-	-
B.G.4	1/2 dek belast + strooiwagen tui 2 UGT	-	-	-	1.00	-	-	-	-
B.G.5	1/2 dek belast + strooiwagen tui 3 UGT	-	-	-	-	1.00	-	-	-
B.G.6	Wagen klasse 30 stand 1 UGT	-	-	-	-	-	1.00	-	-
B.G.7	Wagen klasse 30 stand 2a UGT	-	-	-	-	-	-	1.00	-
B.G.8	Wagen klasse 30 stand 2b UGT	-	-	-	-	-	-	-	1.00
B.G.9	Wagen klasse 30 stand 3a UGT	-	-	-	-	-	-	-	-
B.G.10	Wagen klasse 30 stand 3b UGT	-	-	-	-	-	-	-	-
B.G.11	Schaakbord 1 UGT	-	-	-	-	-	-	-	-
B.G.12	Schaakbord 2 UGT	-	-	-	-	-	-	-	-
B.G.	Omschrijving	Fu.C.9	Fu.C.10	Fu.C.11	Fu.C.12				
B.G.1	eg BGT	-	-	-	-				
B.G.2	var BGT	-	-	-	-				
B.G.3	1/2 dek belast + strooiwagen tui 1 UGT	-	-	-	-				
B.G.4	1/2 dek belast + strooiwagen tui 2 UGT	-	-	-	-				
B.G.5	1/2 dek belast + strooiwagen tui 3 UGT	-	-	-	-				
B.G.6	Wagen klasse 30 stand 1 UGT	-	-	-	-				
B.G.7	Wagen klasse 30 stand 2a UGT	-	-	-	-				
B.G.8	Wagen klasse 30 stand 2b UGT	-	-	-	-				
B.G.9	Wagen klasse 30 stand 3a UGT	1.00	-	-	-				
B.G.10	Wagen klasse 30 stand 3b UGT	-	1.00	-	-				
B.G.11	Schaakbord 1 UGT	-	-	1.00	-				
B.G.12	Schaakbord 2 UGT	-	-	-	1.00				

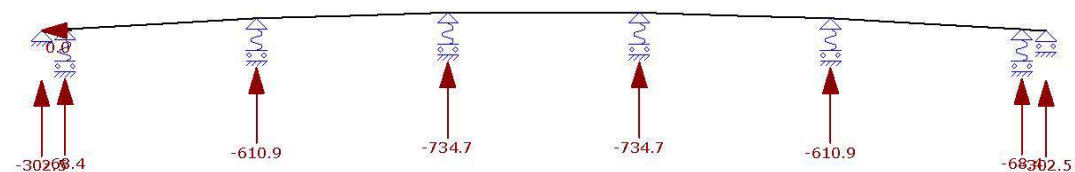
AFB. FU.C.1 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingcombinaties



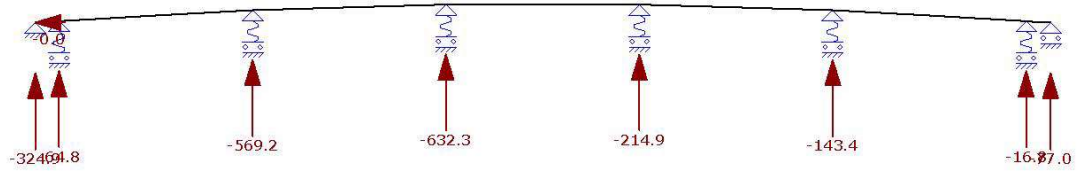
AFB. FU.C.2 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingcombinaties



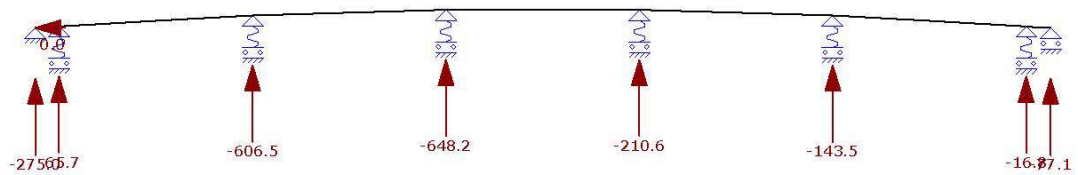
AFB. FU.C.3 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



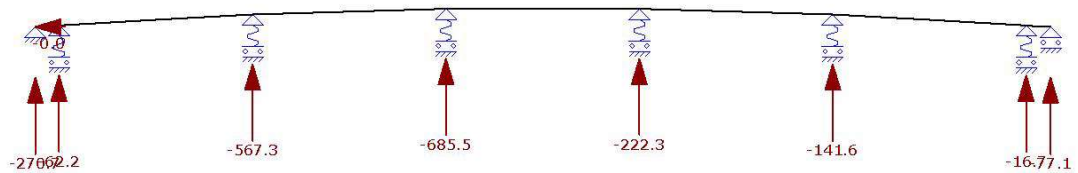
AFB. FU.C.4 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



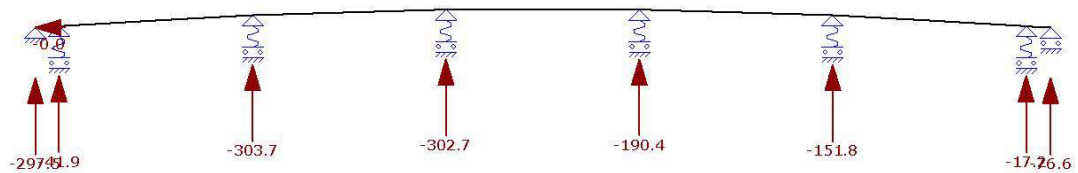
AFB. FU.C.5 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



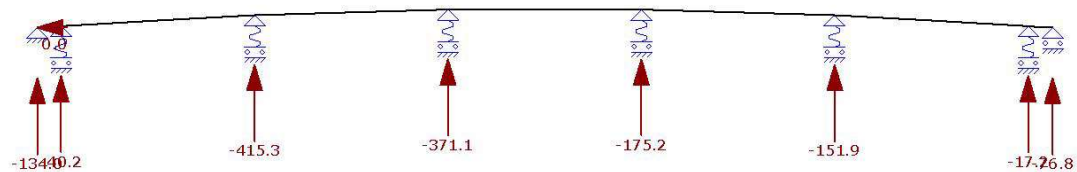
AFB. FU.C.6 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.7 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



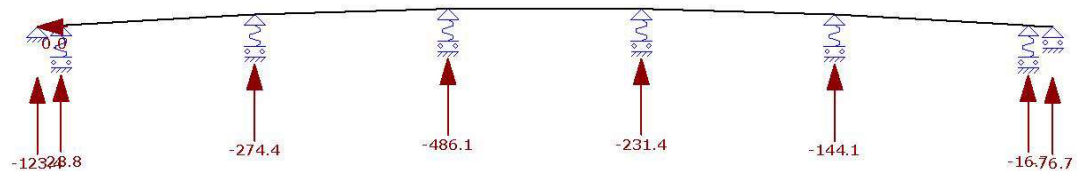
AFB. FU.C.8 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



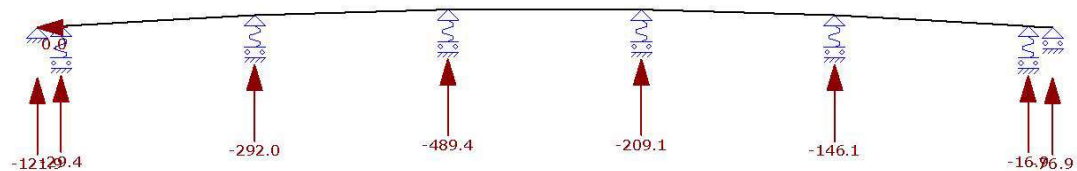
AFB. FU.C.9 OPLEGREACTIES

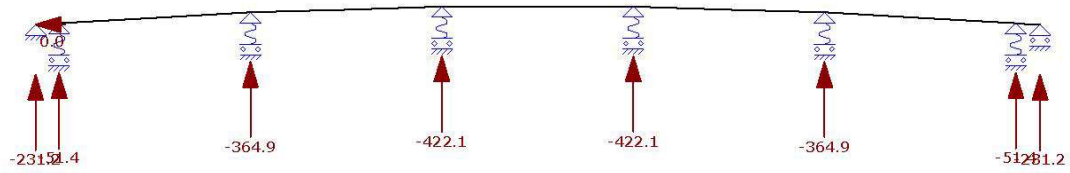
Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.10 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties





AFB. FU.C.4 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.5 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.6 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.7 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.8 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.9 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.10 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.11 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



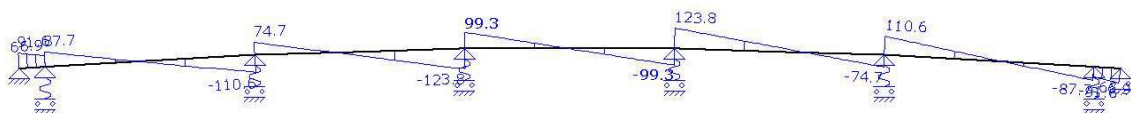
AFB. FU.C.12 NORMAALKRACHT (NX)

Fundamenteel Belastingscombinaties



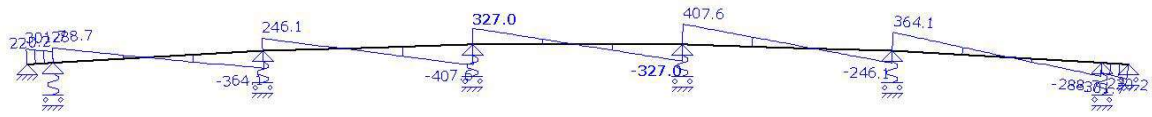
AFB. FU.C.1 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



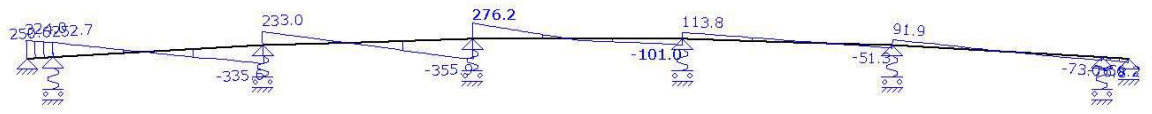
AFB. FU.C.2 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



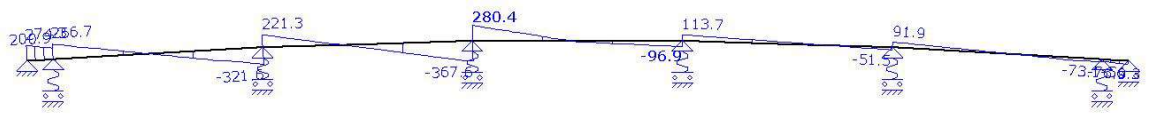
AFB. FU.C.3 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



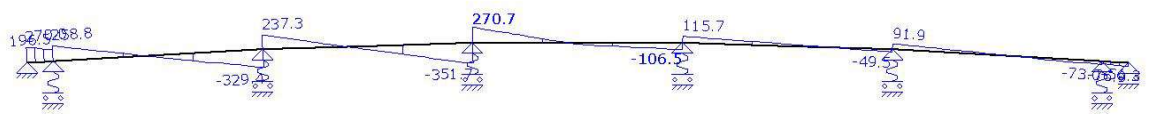
AFB. FU.C.4 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.5 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



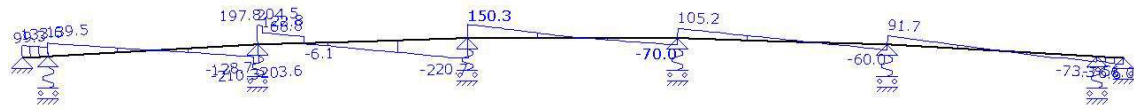
AFB. FU.C.6 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



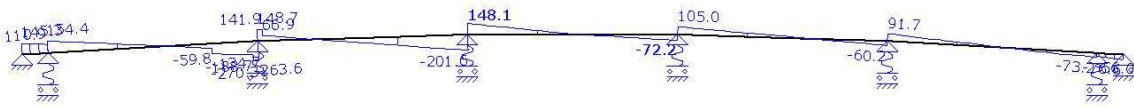
AFB. FU.C.7 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



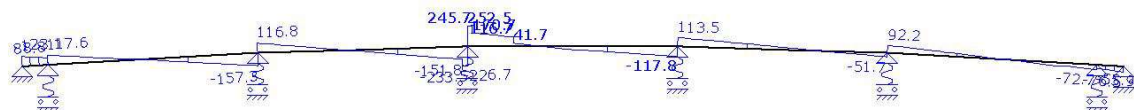
AFB. FU.C.8 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.9 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



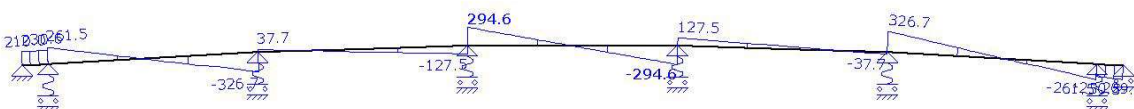
AFB. FU.C.10 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.11 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



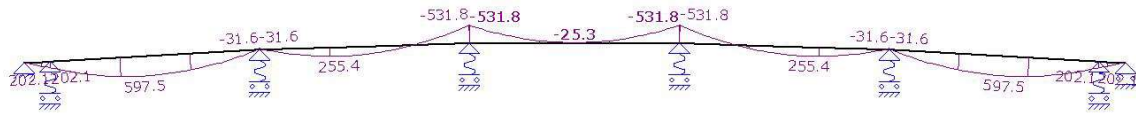
AFB. FU.C.12 DWARSKRACHT (VZ)

Fundamenteel Belastingscombinaties



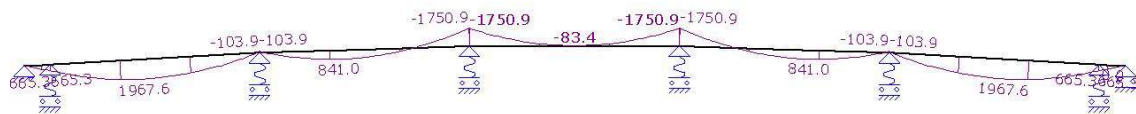
AFB. FU.C.1 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



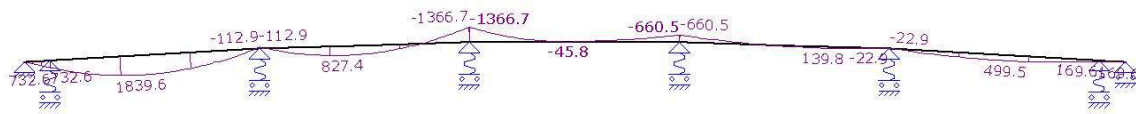
AFB. FU.C.2 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



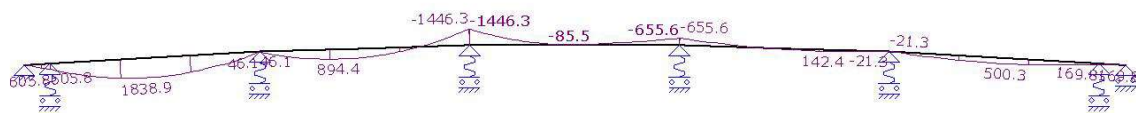
AFB. FU.C.3 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.4 MOMENT (MY)

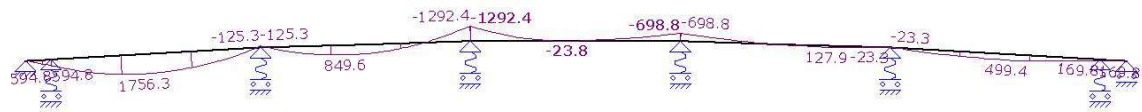
Fundamenteel Belastingscombinaties



--	--	--

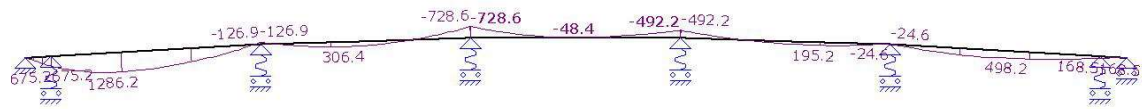
AFB. FU.C.5 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



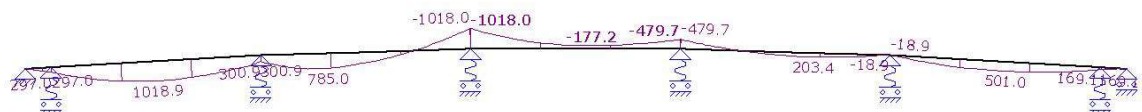
AFB. FU.C.6 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



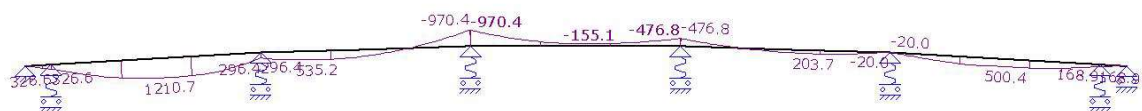
AFB. FU.C.7 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



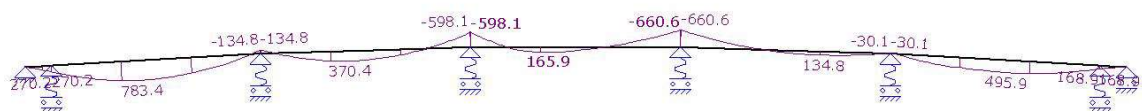
AFB. FU.C.8 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C.9 MOMENT (MY)

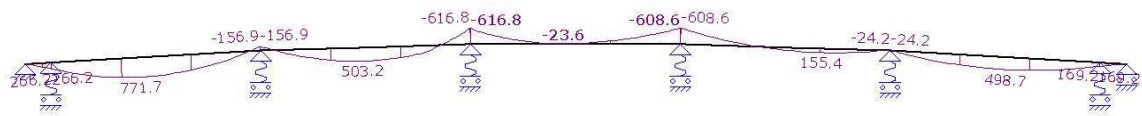
Fundamenteel Belastingscombinaties



--	--	--

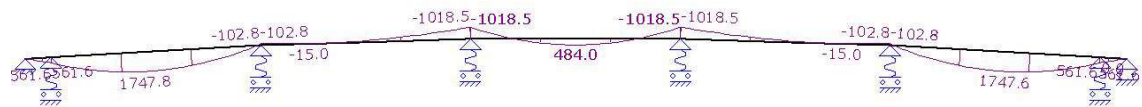
AFB. FU.C.10 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



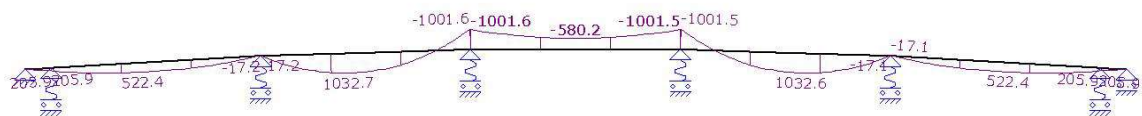
AFB. FU.C.11 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



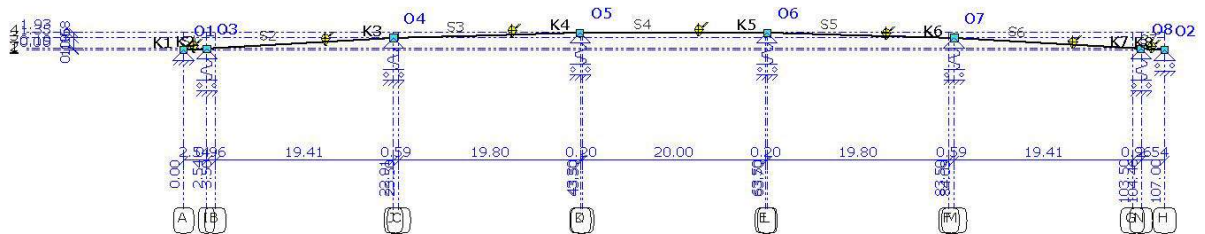
AFB. FU.C.12 MOMENT (MY)

Fundamenteel Belastingscombinaties



Projectnaam	Ringvaartplasbrug VVK 2D	Projectnummer	
Omschrijving	Rapport tbv knik	Constructeur	Lennart Kraaijenbrink
Opdrachtgever	0884858	Eenheden	m, kN, kNm
Bestand	C:\Users\Lennart\Downloads\frequentie test 1.4 NIEUW.mxe		

AFB. GEOMETRIE RAAMWERK



AFB. GEOMETRIE 2 STAVEN EN KNOPEN



STAVEN

Staaf	Knoop B	B	Scharnier E	Knoop E	Profiel	X-B	Z-B	X-E	Z-E	Lengte
S1	K1	NVM	NVM	K2	P1	0,000	0,000	2,543	-0,186	2,550
S2	K2	NVM	NVM	K3	P1	2,543	-0,186	22,909	-1,347	20,399
S3	K3	NVM	NVM	K4	P1	22,909	-1,347	43,300	-1,927	20,399
S4	K4	NVM	NVM	K5	P1	43,300	-1,927	63,700	-1,927	20,400
S5	K5	NVM	NVM	K6	P1	63,700	-1,927	84,091	-1,347	20,399
S6	K6	NVM	NVM	K7	P1	84,091	-1,347	104,457	-0,186	20,399
S7	K7	NVM	NVM	K8	P1	104,457	-0,186	107,000	0,000	2,550
-	-	-	-	-	-	m	m	m	m	m

PROFIELEN

Profiel	Profielnaam	Oppervlakte	Iy Materiaal	Hoek
P1	VVK nieuwe	2.1787e-01	3.7455e-02 VVK sterkte (UGT), kort	0
-	-	m2	m4 -	°

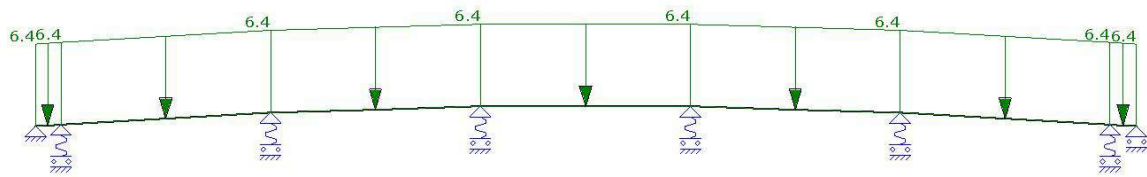
MATERIALEN

Materiaal	Dichtheid	E-Modulus	Uitzettingcoëff
VVK sterkte (UGT), kort	19.12	1.6478e+07	13.2000e-07
-	kN/m3	kN/m2	C°m

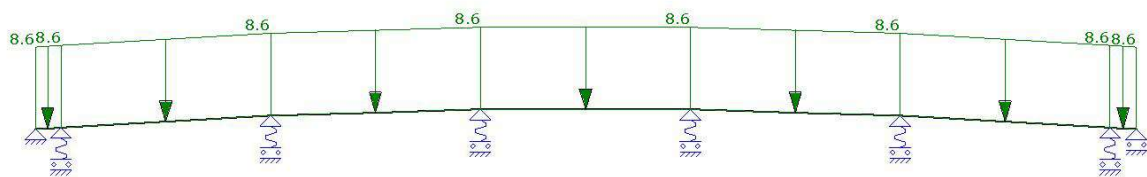
OPLEGGINGEN

Oplegging	Knoop	X	Z	Yr	HoekYr
O1	K1	vast	vast	vrij	0
O2	K8	vrij	vast	vrij	0
O3	K2	vrij	1104	vrij	0
O4	K3	vrij	2436	vrij	0
O5	K4	vrij	6493	vrij	0
O6	K5	vrij	6493	vrij	0
O7	K6	vrij	2436	vrij	0
O8	K7	vrij	1104	vrij	0
-	-	kN/m	kN/m	kNmrad	°

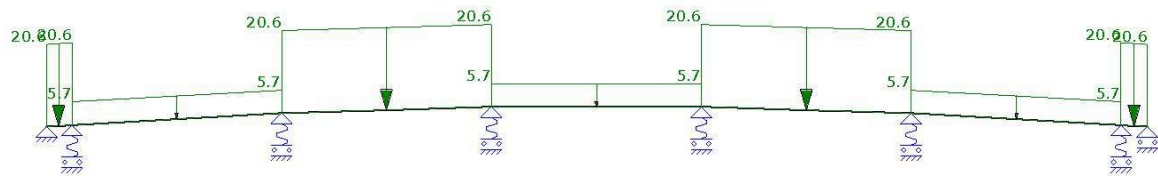
AFB. LASTEN B.G.1 EG BGT



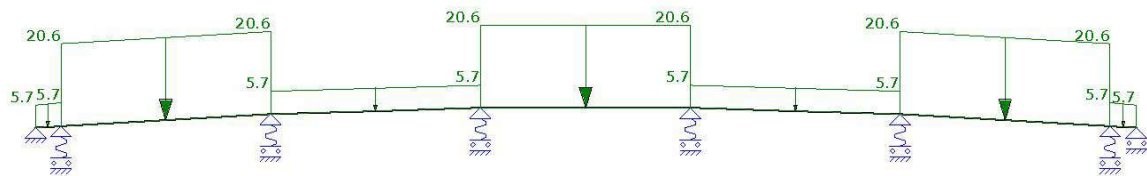
AFB. LASTEN B.G.2 VAR BGT



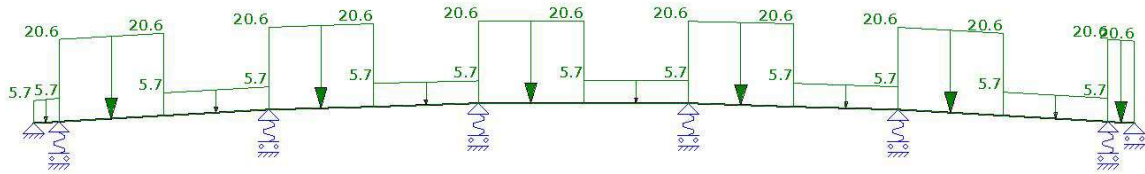
AFB. LASTEN B.G.3 SCHAAKBORD 1 UGT



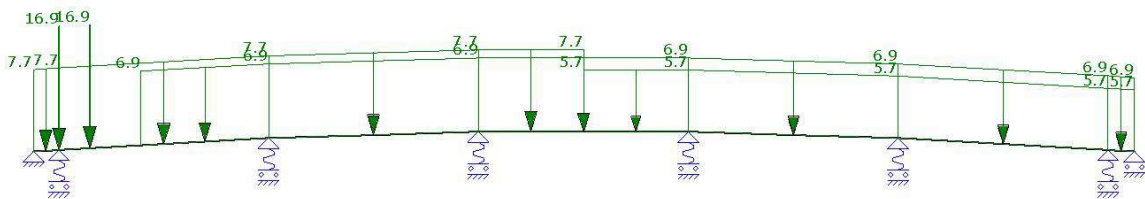
AFB. LASTEN B.G.4 SCHAAKBORD 2 UGT



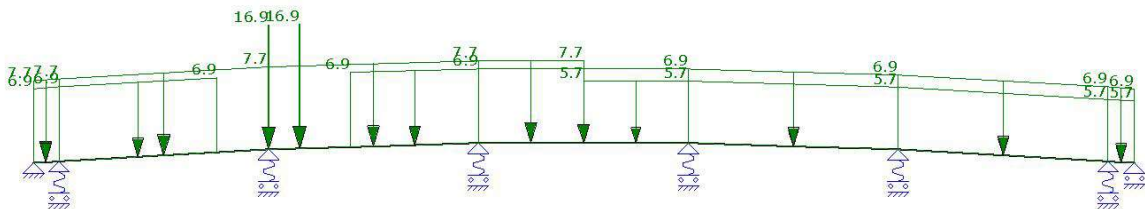
AFB. LASTEN B.G.5 SCHAARBORD 3 UGT



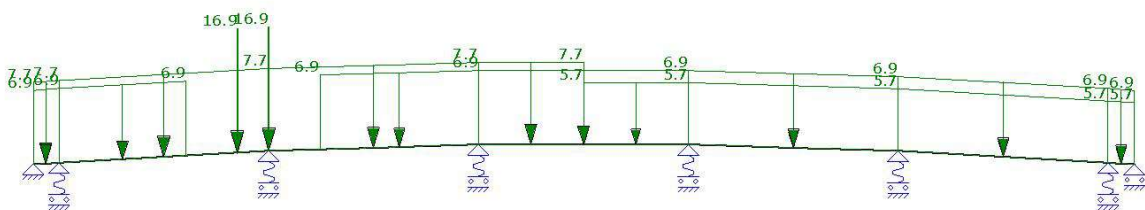
AFB. LASTEN B.G.6 DIENSTWAGEN STAND 1 UGT



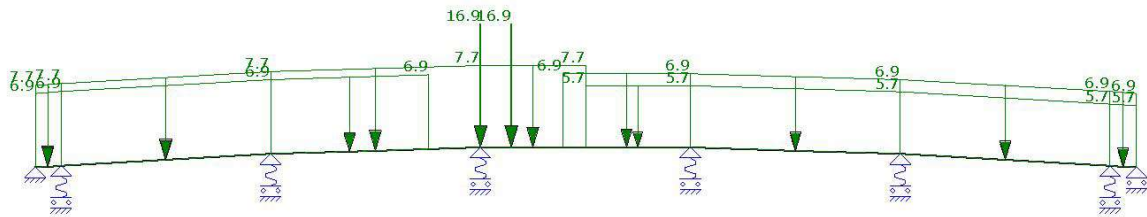
AFB. LASTEN B.G.7 DIENSTWAGEN STAND 2A UGT



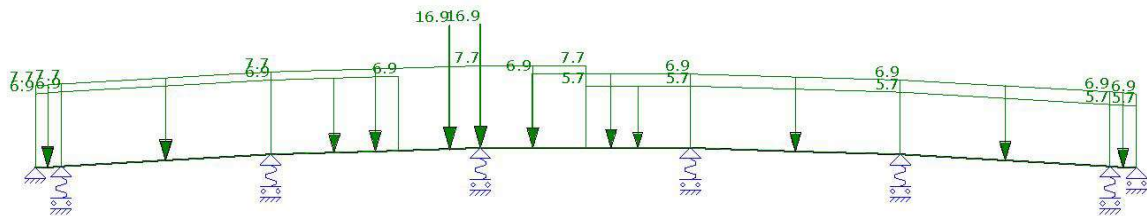
AFB. LASTEN B.G.8 DIENSTWAGEN STAND 2B UGT



AFB. LASTEN B.G.9 DIENSTWAGEN STAND 3A UGT



AFB. LASTEN B.G.10 DIENSTWAGEN STAND 3B UGT

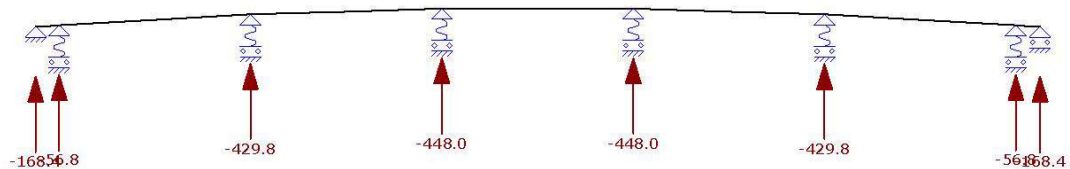


FUNDAMENTEEL BELASTINGSCOMBINATIES (TABEL)

B.G.	Omschrijving	Fu.C.1	Fu.C.2
B.G.1	eg BGT	1.20	-
B.G.2	var BGT	1.50	-
B.G.3	Schaakbord 1 UGT	-	-
B.G.4	Schaakbord 2 UGT	-	1.00
B.G.5	Schaakbord 3 UGT	-	-
B.G.6	Dienstwagen stand 1 UGT	-	-
B.G.7	Dienstwagen stand 2A UGT	-	-
B.G.8	Dienstwagen stand 2B UGT	-	-
B.G.9	Dienstwagen stand 3A UGT	-	-
B.G.10	Dienstwagen stand 3B UGT	-	-

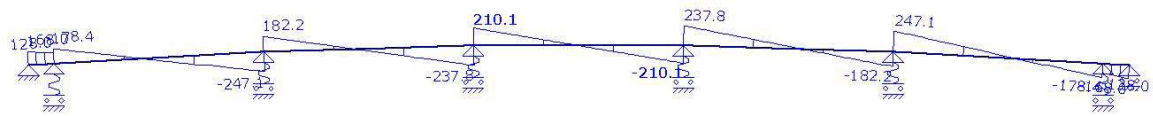
AFB. FU.C. OPLEGREACTIES OMHULLENDE

Fundamenteel Belastingcombinaties



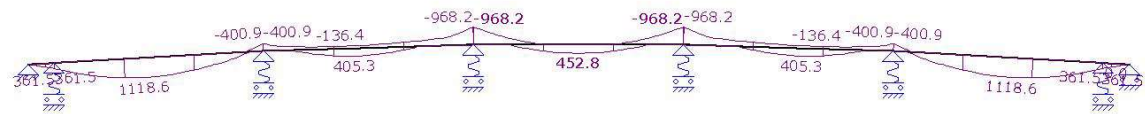
AFB. FU.C. DWARSKRACHT (VZ) OMHULLENDE

Fundamenteel Belastingscombinaties



AFB. FU.C. MOMENT (MY) OMHULLENDE

Fundamenteel Belastingscombinaties

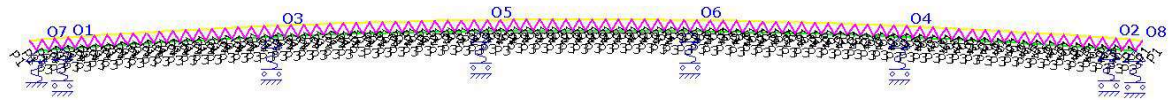


Projectnaam	VSB	Projectnummer	
Omschrijving		Constructeur	Lennart Kraaijenbrink
Opdrachtgever	0884858	Eenheden	m, kN, kNm
Bestand	C:\Users\Lennart\Downloads\ringvaartplas brug 2D vakwerk.mxe		

AFB. GEOMETRIE RAAMWERK



AFB. GEOMETRIE 2 STAVEN EN KNOPEN



PROFIELEN

Profiel	Profielnaam	Oppervlakte	Materiaal
P1	K160x160x8x8	4.8640e-03	VVK stabiliteit (UGT), kort
P2	K240x240x20x20	1.7600e-02	VVK stabiliteit (UGT), kort
P3	VVK dek	8.9250e-02	Mat. 1
-	-	m2	-

PROFIELVORMEN

Profiel	Verl. h.	hB	hE	tf	tw	tf2	B	bL	bR Raatl.	Hoogte
P1	Nee	0.160	0.160	0.008	0.008	0.000	0.160	0.000	0.000 Nee	0.000
P2	Nee	0.240	0.240	0.020	0.020	0.000	0.240	0.000	0.000 Nee	0.000
-	-	m	m	m	m	m	m	m	m -	m

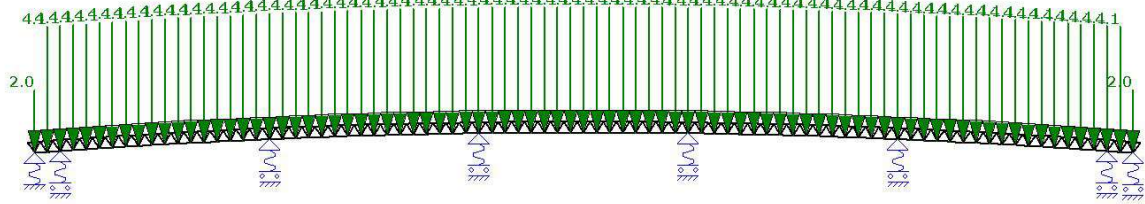
MATERIALEN

Materiaal	Dichtheid	E-Modulus	Uitzettingcoeff
VVK stabiliteit (UGT), kort	19.12	1.4980e+07	13.2000e-07
Mat. 1	0.00	2.4267e+07	0.0000e-01
-	kN/m3	kN/m2	C°m

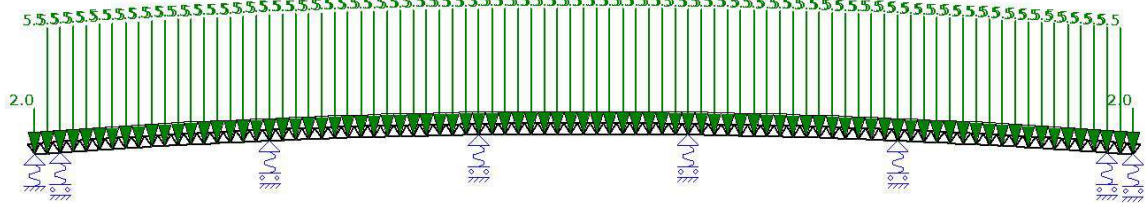
OPLEGGINGEN

Oplegging	Knoop	X	Z	Yr	HoekYr
O1	K6	vrij	1104	vrij	0
O2	K166	vrij	1104	vrij	0
O3	K38	vrij	2436	vrij	0
O4	K134	vrij	2436	vrij	0
O5	K70	vrij	6493	vrij	0
O6	K102	vrij	6493	vrij	0
O7	K2	vast	1000000	vrij	0
O8	K170	vrij	1000000	vrij	0
-	-	kN/m	kN/m	kNmrad	°

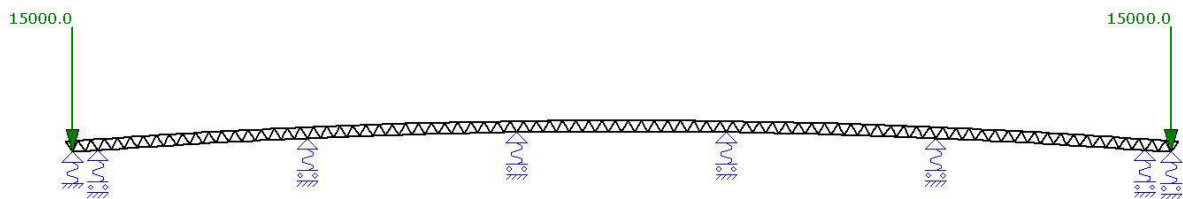
AFB. LASTEN B.G.1 PERMANENT



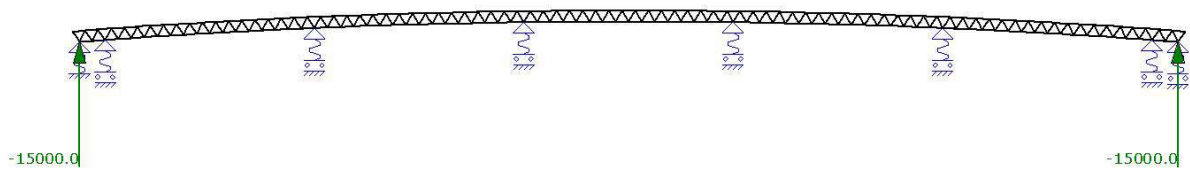
AFB. LASTEN B.G.2 VARIABEL



AFB. LASTEN B.G.3 ZETTING PYLOON



AFB. LASTEN B.G.4 ZETTING LANDHOOFDEN

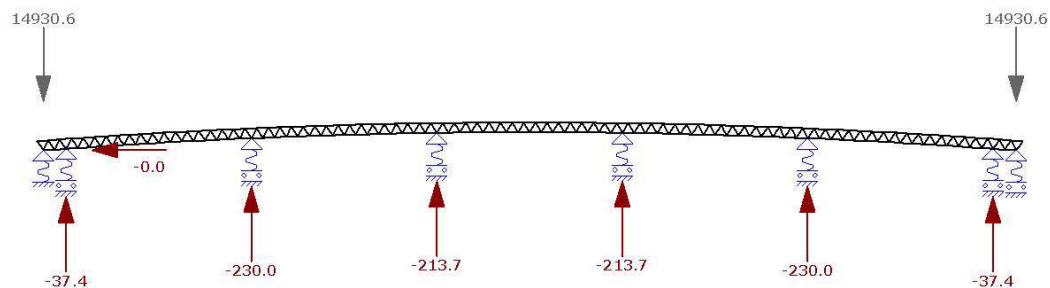


FUNDAMENTEEL BELASTINGSCOMBINATIES (TABEL)

B.G.	Omschrijving	Fu.C.1
B.G.1	Permanent	1.20
B.G.2	variabel	1.50
B.G.3	Zetting pyloon	-
B.G.4	Zetting landhoofden	1.00

AFB. FU.C. OPLEGREACTIES OMHULLENDE

Fundamenteel Belastingscombinaties



FU.C. STAAFKRACHTEN

Staal	B.C.	T/D	Nmax
S1	Fu.C.1	T	32.91
S2	Fu.C.1	T	101.48
S3	Fu.C.1	T	176.73
S4	Fu.C.1	T	258.13
S5	Fu.C.1	T	321.73
S6	Fu.C.1	T	372.38
S7	Fu.C.1	T	407.08
S8	Fu.C.1	T	426.67
S9	Fu.C.1	T	431.22
S10	Fu.C.1	T	419.79
S11	Fu.C.1	T	392.84
S12	Fu.C.1	T	350.36
S13	Fu.C.1	T	292.35
S14	Fu.C.1	T	218.81
S15	Fu.C.1	T	129.73
S16	Fu.C.1	T	25.08
S17	Fu.C.1	D	-94.95
S18	Fu.C.1	D	-230.76
S19	Fu.C.1	D	-255.74
S20	Fu.C.1	D	-150.99
S21	Fu.C.1	D	-61.82
S22	Fu.C.1	T	10.44
S23	Fu.C.1	T	69.01
S24	Fu.C.1	T	112.96
S25	Fu.C.1	T	140.15
S26	Fu.C.1	T	151.63
S27	Fu.C.1	T	147.89
S28	Fu.C.1	T	128.45
S29	Fu.C.1	T	93.46
S30	Fu.C.1	T	42.92
S31	Fu.C.1	D	-23.16
S32	Fu.C.1	D	-104.79
S33	Fu.C.1	D	-201.97
S34	Fu.C.1	D	-314.70
S36	Fu.C.1	D	-210.85
S37	Fu.C.1	D	-118.25
S38	Fu.C.1	D	-40.05
S39	Fu.C.1	T	22.38

--	--	--

Staaf	B.C.	T/D	Nmax
S40	Fu.C.1	T	68.95
S41	Fu.C.1	T	100.12
S42	Fu.C.1	T	115.67
S43	Fu.C.1	T	115.67
S44	Fu.C.1	T	100.12
S45	Fu.C.1	T	68.95
S46	Fu.C.1	T	22.38
S47	Fu.C.1	D	-40.05
S48	Fu.C.1	D	-118.25
S49	Fu.C.1	D	-210.85
S50	Fu.C.1	D	-319.69
S51	Fu.C.1	D	-314.70
S52	Fu.C.1	D	-201.97
S53	Fu.C.1	D	-104.79
S54	Fu.C.1	D	-23.16
S56	Fu.C.1	T	93.46
S57	Fu.C.1	T	128.45
S58	Fu.C.1	T	147.89
S59	Fu.C.1	T	151.63
S60	Fu.C.1	T	140.15
S61	Fu.C.1	T	112.96
S62	Fu.C.1	T	69.01
S63	Fu.C.1	T	10.44
S64	Fu.C.1	D	-61.82
S65	Fu.C.1	D	-150.99
S66	Fu.C.1	D	-255.74
S67	Fu.C.1	D	-230.76
S68	Fu.C.1	D	-94.95
S69	Fu.C.1	T	25.08
S70	Fu.C.1	T	129.73
S71	Fu.C.1	T	218.81
S72	Fu.C.1	T	292.35
S73	Fu.C.1	T	350.36
S74	Fu.C.1	T	392.84
S75	Fu.C.1	T	419.79
S76	Fu.C.1	T	431.22
S77	Fu.C.1	T	426.67
S79	Fu.C.1	T	372.37
S80	Fu.C.1	T	321.73
S81	Fu.C.1	T	258.13
S82	Fu.C.1	T	176.73
S83	Fu.C.1	T	101.48
S84	Fu.C.1	T	32.91
S85	Fu.C.1	-	0.00
S86	Fu.C.1	D	-75.28
S87	Fu.C.1	D	-135.25
S88	Fu.C.1	D	-223.99
S89	Fu.C.1	D	-296.76
S90	Fu.C.1	D	-353.89
S91	Fu.C.1	D	-395.67
S92	Fu.C.1	D	-421.96
S93	Fu.C.1	D	-433.21
S95	Fu.C.1	D	-409.07
S96	Fu.C.1	D	-373.65
S97	Fu.C.1	D	-322.73
S98	Fu.C.1	D	-256.33
S99	Fu.C.1	D	-174.46
S100	Fu.C.1	D	-77.02
S101	Fu.C.1	T	35.80
S102	Fu.C.1	T	164.16
S103	Fu.C.1	T	307.99
S104	Fu.C.1	T	195.98
S105	Fu.C.1	T	99.66
S106	Fu.C.1	T	18.73
S107	Fu.C.1	D	-46.70
S108	Fu.C.1	D	-96.69

--	--	--

Staaf	B.C.	T/D	Nmax
S109	Fu.C.1	D	-131.23
S110	Fu.C.1	D	-150.14
S111	Fu.C.1	D	-153.62
S112	Fu.C.1	D	-141.68
S113	Fu.C.1	D	-114.15
S114	Fu.C.1	D	-71.13
S115	Fu.C.1	D	-12.57
S116	Fu.C.1	T	61.48
S117	Fu.C.1	T	151.04
S118	Fu.C.1	T	256.12
S119	Fu.C.1	T	376.70
S120	Fu.C.1	T	260.38
S121	Fu.C.1	T	160.03
S122	Fu.C.1	T	74.70
S123	Fu.C.1	T	4.48
S124	Fu.C.1	D	-49.79
S125	Fu.C.1	D	-88.55
S126	Fu.C.1	D	-111.86
S127	Fu.C.1	D	-119.61
S128	Fu.C.1	D	-111.86
S129	Fu.C.1	D	-88.55
S130	Fu.C.1	D	-49.79
S131	Fu.C.1	T	4.48
S132	Fu.C.1	T	74.70
S133	Fu.C.1	T	160.03
S134	Fu.C.1	T	260.38
S135	Fu.C.1	T	376.70
S136	Fu.C.1	T	256.12
S137	Fu.C.1	T	151.04
S138	Fu.C.1	T	61.48
S139	Fu.C.1	D	-12.57
S140	Fu.C.1	D	-71.13
S141	Fu.C.1	D	-114.15
S142	Fu.C.1	D	-141.68
S143	Fu.C.1	D	-153.62
S144	Fu.C.1	D	-150.14
S145	Fu.C.1	D	-131.23
S146	Fu.C.1	D	-96.69
S147	Fu.C.1	D	-46.70
S148	Fu.C.1	T	18.73
S149	Fu.C.1	T	99.66
S150	Fu.C.1	T	195.98
S151	Fu.C.1	T	307.99
S152	Fu.C.1	T	164.16
S153	Fu.C.1	T	35.80
S154	Fu.C.1	D	-77.02
S155	Fu.C.1	D	-174.46
S156	Fu.C.1	D	-256.33
S157	Fu.C.1	D	-322.73
S158	Fu.C.1	D	-373.65
S159	Fu.C.1	D	-409.07
S160	Fu.C.1	D	-429.00
S161	Fu.C.1	D	-433.21
S162	Fu.C.1	D	-421.95
S163	Fu.C.1	D	-395.67
S164	Fu.C.1	D	-353.89
S165	Fu.C.1	D	-296.75
S166	Fu.C.1	D	-223.99
S167	Fu.C.1	D	-135.24
S168	Fu.C.1	D	-75.28
S169	Fu.C.1	-	0.00
S170	Fu.C.1	-	0.00
S171	Fu.C.1	D	-74.01
S172	Fu.C.1	T	74.08
S173	Fu.C.1	D	-58.72
S174	Fu.C.1	T	59.24

--	--	--

Staaf	B.C.	T/D	Nmax
S175	Fu.C.1	D	-88.35
S176	Fu.C.1	T	85.99
S177	Fu.C.1	D	-72.53
S178	Fu.C.1	T	70.42
S179	Fu.C.1	D	-55.54
S180	Fu.C.1	T	56.86
S181	Fu.C.1	D	-40.92
S182	Fu.C.1	T	41.28
S183	Fu.C.1	D	-25.25
S184	Fu.C.1	T	26.50
S185	Fu.C.1	D	-10.41
S186	Fu.C.1	T	11.74
S187	Fu.C.1	T	4.37
S188	Fu.C.1	D	-3.92
S189	Fu.C.1	D	-429.00
S190	Fu.C.1	T	20.03
S191	Fu.C.1	D	-19.17
S192	Fu.C.1	T	35.24
S193	Fu.C.1	D	-34.43
S194	Fu.C.1	T	50.43
S195	Fu.C.1	D	-49.72
S196	Fu.C.1	T	65.60
S197	Fu.C.1	D	-65.03
S198	Fu.C.1	T	80.76
S199	Fu.C.1	D	-80.33
S200	Fu.C.1	T	95.93
S201	Fu.C.1	D	-95.75
S202	Fu.C.1	T	111.12
S203	Fu.C.1	D	-111.00
S204	Fu.C.1	T	126.17
S205	Fu.C.1	D	-126.54
S206	Fu.C.1	T	141.48
S207	Fu.C.1	D	-141.48
S208	Fu.C.1	D	-110.68
S209	Fu.C.1	T	109.84
S210	Fu.C.1	D	-95.02
S211	Fu.C.1	T	94.61
S212	Fu.C.1	D	-79.61
S213	Fu.C.1	T	79.61
S214	Fu.C.1	D	-63.64
S215	Fu.C.1	T	65.20
S216	Fu.C.1	D	-48.50
S217	Fu.C.1	T	49.92
S218	Fu.C.1	D	-33.89
S219	Fu.C.1	T	34.04
S220	Fu.C.1	D	-18.53
S221	Fu.C.1	T	18.67
S222	Fu.C.1	D	-3.11
S223	Fu.C.1	T	3.74
S224	Fu.C.1	T	11.82
S225	Fu.C.1	D	-11.67
S226	Fu.C.1	T	27.21
S227	Fu.C.1	D	-26.94
S228	Fu.C.1	T	42.42
S229	Fu.C.1	D	-42.23
S230	Fu.C.1	T	57.63
S231	Fu.C.1	D	-57.54
S232	Fu.C.1	T	72.81
S233	Fu.C.1	D	-72.86
S234	Fu.C.1	T	87.99
S235	Fu.C.1	D	-88.21
S236	Fu.C.1	T	103.14
S237	Fu.C.1	D	-103.56
S238	Fu.C.1	T	118.28
S239	Fu.C.1	D	-118.94
S240	Fu.C.1	D	-319.69

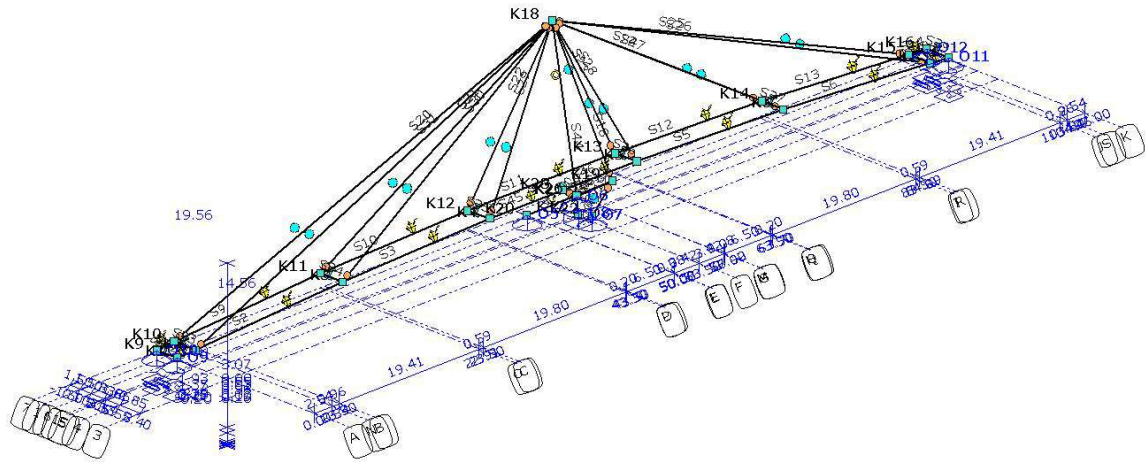
--	--	--

Staaf	B.C.	T/D	Nmax
S241	Fu.C.1	D	-114.74
S242	Fu.C.1	T	114.09
S243	Fu.C.1	D	-99.38
S244	Fu.C.1	T	98.04
S245	Fu.C.1	D	-83.24
S246	Fu.C.1	T	83.91
S247	Fu.C.1	D	-68.80
S248	Fu.C.1	T	68.74
S249	Fu.C.1	D	-53.40
S250	Fu.C.1	T	53.37
S251	Fu.C.1	D	-38.01
S252	Fu.C.1	T	38.29
S253	Fu.C.1	D	-22.87
S254	Fu.C.1	T	22.99
S255	Fu.C.1	D	-7.51
S256	Fu.C.1	T	7.74
S257	Fu.C.1	T	7.74
S258	Fu.C.1	D	-7.51
S259	Fu.C.1	T	22.99
S260	Fu.C.1	D	-22.87
S261	Fu.C.1	T	38.29
S262	Fu.C.1	D	-38.01
S263	Fu.C.1	T	53.37
S264	Fu.C.1	D	-53.40
S265	Fu.C.1	T	68.74
S266	Fu.C.1	D	-68.80
S267	Fu.C.1	T	83.91
S268	Fu.C.1	D	-83.24
S269	Fu.C.1	T	98.04
S270	Fu.C.1	D	-99.38
S271	Fu.C.1	T	114.09
S272	Fu.C.1	D	-114.74
S273	Fu.C.1	D	-118.94
S274	Fu.C.1	T	118.28
S275	Fu.C.1	D	-103.56
S276	Fu.C.1	T	103.14
S277	Fu.C.1	D	-88.21
S278	Fu.C.1	T	87.99
S279	Fu.C.1	D	-72.86
S280	Fu.C.1	T	72.81
S281	Fu.C.1	T	42.92
S282	Fu.C.1	D	-57.54
S283	Fu.C.1	T	57.63
S284	Fu.C.1	D	-42.23
S285	Fu.C.1	T	42.42
S286	Fu.C.1	D	-26.94
S287	Fu.C.1	T	27.21
S288	Fu.C.1	D	-11.67
S289	Fu.C.1	T	11.82
S290	Fu.C.1	T	3.74
S291	Fu.C.1	D	-3.11
S292	Fu.C.1	T	18.67
S293	Fu.C.1	D	-18.53
S294	Fu.C.1	T	34.04
S295	Fu.C.1	D	-33.89
S296	Fu.C.1	T	49.92
S297	Fu.C.1	D	-48.50
S298	Fu.C.1	T	65.20
S299	Fu.C.1	D	-63.64
S300	Fu.C.1	T	79.61
S301	Fu.C.1	D	-79.61
S302	Fu.C.1	T	94.61
S303	Fu.C.1	D	-95.02
S304	Fu.C.1	T	109.84
S305	Fu.C.1	D	-110.68
S306	Fu.C.1	D	-141.48

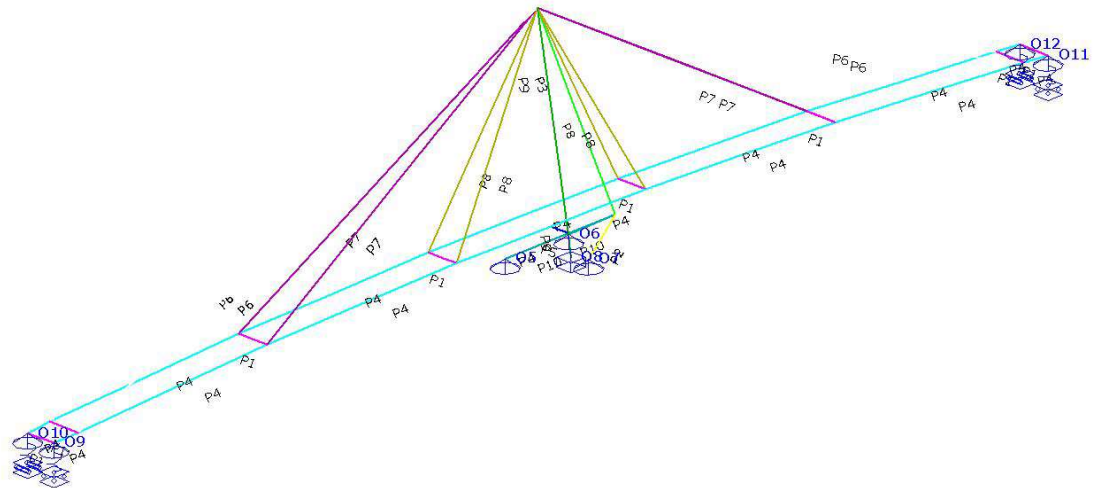
Staaf	B.C.	T/D	Nmax
S307	Fu.C.1	T	141.48
S308	Fu.C.1	D	-126.54
S309	Fu.C.1	T	126.17
S310	Fu.C.1	D	-111.00
S311	Fu.C.1	T	111.12
S312	Fu.C.1	D	-95.75
S313	Fu.C.1	T	95.93
S314	Fu.C.1	D	-80.33
S315	Fu.C.1	T	80.76
S316	Fu.C.1	D	-65.03
S317	Fu.C.1	T	65.60
S318	Fu.C.1	D	-49.72
S319	Fu.C.1	T	50.43
S320	Fu.C.1	D	-34.43
S321	Fu.C.1	T	35.24
S322	Fu.C.1	D	-19.17
S323	Fu.C.1	T	20.03
S324	Fu.C.1	D	-3.92
S325	Fu.C.1	T	4.37
S326	Fu.C.1	T	11.75
S327	Fu.C.1	D	-10.41
S328	Fu.C.1	T	407.08
S329	Fu.C.1	T	26.50
S330	Fu.C.1	D	-25.25
S331	Fu.C.1	T	41.28
S332	Fu.C.1	D	-40.92
S333	Fu.C.1	T	56.86
S334	Fu.C.1	D	-55.54
S335	Fu.C.1	T	70.42
S336	Fu.C.1	D	-72.53
S337	Fu.C.1	T	85.99
S338	Fu.C.1	D	-88.35
S339	Fu.C.1	T	59.24
S340	Fu.C.1	D	-58.72
S341	Fu.C.1	T	74.08
S342	Fu.C.1	D	-74.01
S343	Fu.C.1	-	0.00
-	-	-	KN

Projectnaam	Ringvaartplasbrug VVK 3D	Projectnummer	
Omschrijving	Rapport tbv pyloon	Constructeur	Lennart Kraaijenbrink
Opdrachtgever	0884858	Eenheden	m, kN, kNm
Bestand	C:\Users\Lennart\Downloads\ringvaartplas brug 3D nieuwe belastingen 1.3.mxe		

AFB. GEOMETRIE RAAMWERK



AFB. GEOMETRIE 2 STAVEN EN KNOPEN



STAVEN

STAAL

Staaf	Knoop	Scharnier		Knoop	Profiel	X-B	Y-B	Z-B	X-E	Y-E	Z-E	Lengte
	B	B	E	E								
S1	K1	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K2	P4	0,000	1,500	0,000	2,543	1,500	-0,186	2,550
S2	K2	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K3	P4	2,543	1,500	-0,186	22,909	1,500	-1,347	20,399
S3	K3	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K4	P4	22,909	1,500	-1,347	43,300	1,500	-1,927	20,399
S5	K5	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K6	P4	63,700	1,500	-1,927	84,091	1,500	-1,347	20,399

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Staaf	Knoop B	Scharnier B E		Knoop E	Profiel	X-B	Y-B	Z-B	X-E	Y-E	Z-E	Lengte
S6	K6	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K7	P4	84,091	1,500	-1,347	104,457	1,500	-0,186	20,399
S7	K7	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K8	P4	104,457	1,500	-0,186	107,000	1,500	0,000	2,550
S8	K9	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K10	P4	0,000	-1,500	0,000	2,543	-1,500	-0,186	2,550
S9	K10	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K11	P4	2,543	-1,500	-0,186	22,909	-1,500	-1,347	20,399
S10	K11	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K12	P4	22,909	-1,500	-1,347	43,300	-1,500	-1,927	20,399
S11	K12	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K13	P4	43,300	-1,500	-1,927	63,700	-1,500	-1,927	20,400
S12	K13	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K14	P4	63,700	-1,500	-1,927	84,091	-1,500	-1,347	20,399
S13	K14	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K15	P4	84,091	-1,500	-1,347	104,457	-1,500	-0,186	20,399
S14	K15	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K16	P4	104,457	-1,500	-0,186	107,000	-1,500	0,000	2,550
S16	K19	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K20	P10	53,500	8,403	-5,000	50,075	0,000	0,200	10,459
S17	K19	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K21	P10	53,500	8,403	-5,000	56,925	0,000	0,200	10,459
S18	K19	XYZXr--	XYZXr--	K18	P3	53,500	8,403	-5,000	53,500	0,000	-19,557	16,808
S19	K19	XYZXr--	XYZXrYrZr	K22	P2	53,500	8,403	-5,000	53,500	5,553	-0,388	5,422
S20	K18	XYZXr--	XYZXr--	K10	P6	53,500	0,000	-19,557	2,543	-1,500	-0,186	54,535
S21	K18	XYZXr--	XYZXr--	K11	P7	53,500	0,000	-19,557	22,909	-1,500	-1,347	35,632
S22	K18	XYZXr--	XYZXr--	K12	P8	53,500	0,000	-19,557	43,300	-1,500	-1,927	20,423
S23	K18	XYZXr--	XYZXr--	K13	P8	53,500	0,000	-19,557	63,700	-1,500	-1,927	20,423
S24	K18	XYZXr--	XYZXr--	K14	P7	53,500	0,000	-19,557	84,091	-1,500	-1,347	35,632
S25	K18	XYZXr--	XYZXr--	K15	P6	53,500	0,000	-19,557	104,457	-1,500	-0,186	54,535
S26	K18	XYZXr--	XYZXr--	K7	P6	53,500	0,000	-19,557	104,457	1,500	-0,186	54,535
S27	K18	XYZXr--	XYZXr--	K6	P7	53,500	0,000	-19,557	84,091	1,500	-1,347	35,632
S28	K18	XYZXr--	XYZXr--	K5	P8	53,500	0,000	-19,557	63,700	1,500	-1,927	20,423
S29	K18	XYZXr--	XYZXr--	K4	P8	53,500	0,000	-19,557	43,300	1,500	-1,927	20,423
S30	K18	XYZXr--	XYZXr--	K3	P7	53,500	0,000	-19,557	22,909	1,500	-1,347	35,632
S31	K18	XYZXr--	XYZXr--	K2	P6	53,500	0,000	-19,557	2,543	1,500	-0,186	54,535
S32	K9	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K1	P1	0,000	-1,500	0,000	0,000	1,500	0,000	3,000
S33	K10	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K2	P1	2,543	-1,500	-0,186	2,543	1,500	-0,186	3,000
S34	K11	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K3	P1	22,909	-1,500	-1,347	22,909	1,500	-1,347	3,000
S35	K12	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K4	P1	43,300	-1,500	-1,927	43,300	1,500	-1,927	3,000
S36	K13	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K5	P1	63,700	-1,500	-1,927	63,700	1,500	-1,927	3,000
S37	K14	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K6	P1	84,091	-1,500	-1,347	84,091	1,500	-1,347	3,000
S38	K15	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K7	P1	104,457	-1,500	-0,186	104,457	1,500	-0,186	3,000
S39	K16	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K8	P1	107,000	-1,500	0,000	107,000	1,500	0,000	3,000
S42	K26	XYZXr--	XYZXr--	K23	P5	53,500	3,328	-1,927	53,500	1,500	-1,927	1,828
S43	K17	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K26	P9	53,500	3,692	0,000	53,500	3,328	-1,927	1,961
S44	K26	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K18	P9	53,500	3,328	-1,927	53,500	0,000	-19,557	17,941
S45	K4	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K23	P4	43,300	1,500	-1,927	53,500	1,500	-1,927	10,200
S46	K23	XYZXrYrZr	XYZXrYrZr	K5	P4	53,500	1,500	-1,927	63,700	1,500	-1,927	10,200
-	-	-	-	-	-	m	m	m	m	m	m	m

PROFIELEN

Profiel	Profielnaam	Oppervlakte	It	Iy	Iz Materiaal	Hoek
P1	HE1000M	4.4421e-02	1.7013e-05	7.2230e-03	1.8459e-04 S235	0
P2	C150	1.7671e-02	4.9701e-05	2.4850e-05	2.4850e-05 S355	0
P3	C45	1.5904e-03	4.0258e-07	2.0129e-07	2.0129e-07 Tui achter nieuwe	0
P4	VVK trog	1.0893e-01	6.1533e-05	1.8918e-02	1.3245e-01 VVK stabiliteit (UGT), kort	0
P5	C30	7.0686e-04	7.9522e-08	3.9761e-08	3.9761e-08 S235	0
P6	C32.8	8.4496e-04	1.1363e-07	5.6815e-08	5.6815e-08 Tui 1 nieuwe	0
P7	C32.8	8.4496e-04	1.1363e-07	5.6815e-08	5.6815e-08 Tui 2 nieuwe	0
P8	C32.8	8.4496e-04	1.1363e-07	5.6815e-08	5.6815e-08 Tui 3 nieuwe	0
P9	B850x45	1.1380e-01	1.8495e-02	9.2473e-03	9.2473e-03 VVK stabiliteit (UGT), kort	0
P10	B480x30	4.2412e-02	2.1566e-03	1.0783e-03	1.0783e-03 VVK stabiliteit (UGT), kort	0
-	-	m2	m4	m4	m4 -	°

PROFIELVORMEN

Profiel	Verl. h.	hB	hE	tf	tw	tf2	B	bL	bR Raatl.	Hoogte
P2	Nee	0.150	0.150	0.000	0.000	0.000	0.150	0.000	0.000 Nee	0.000
P3	Nee	0.045	0.045	0.000	0.000	0.000	0.045	0.000	0.000 Nee	0.000
P5	Nee	0.030	0.030	0.000	0.000	0.000	0.030	0.000	0.000 Nee	0.000
P6	Nee	0.033	0.033	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000 Nee	0.000
P7	Nee	0.033	0.033	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000 Nee	0.000
P8	Nee	0.033	0.033	0.000	0.000	0.000	0.033	0.000	0.000 Nee	0.000

--	--	--

Profiel	Verl. h.	hB	hE	tf	tw	tf2	B	bL	bR Raatl.	Hoogte
P9	Nee	0.850	0.850	0.000	0.045	0.000	0.850	0.000	0.000 Nee	0.000
P10	Nee	0.480	0.480	0.000	0.030	0.000	0.480	0.000	0.000 Nee	0.000
-	-	m	m	m	m	m	m	m	m -	m

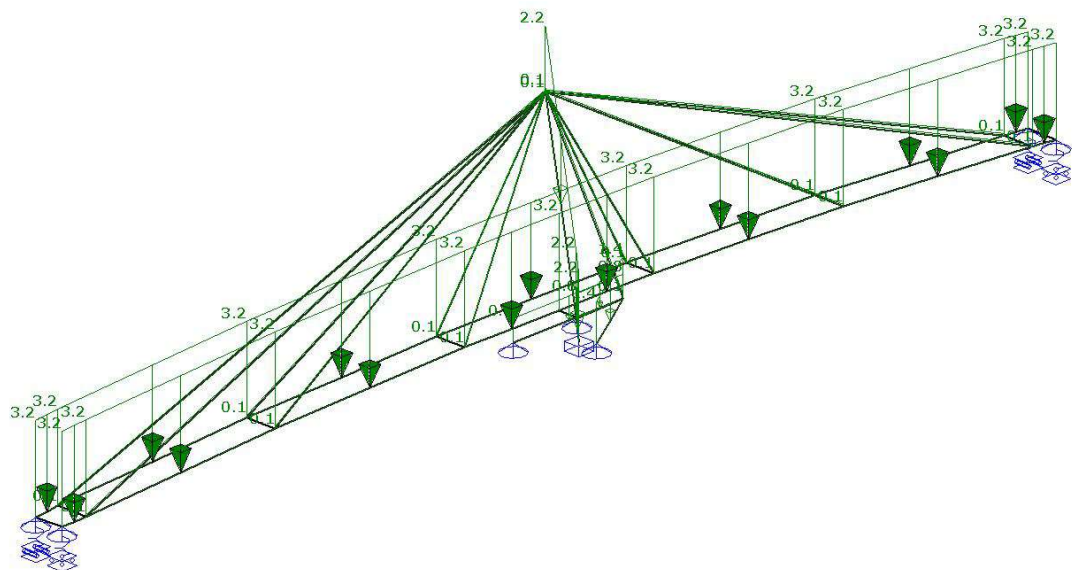
MATERIALEN

Materiaalnaam	Poison	Dichtheid	E-Modulus	Uitzettingcoeff
S355	0.30	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
S235	0.30	78.50	2.1000e+08	12.0000e-06
VVK stabiliteit (UGT), kort	0.30	19.12	1.4980e+07	13.2000e-07
Tui 1 nieuwe	0.30	78.50	1.9942e+08	12.0000e-06
Tui 2 nieuwe	0.30	78.50	1.9943e+08	12.0000e-06
Tui 3 nieuwe	0.30	78.50	1.7329e+08	12.0000e-06
Tui achter nieuwe	0.30	78.50	2.0460e+08	12.0000e-06
-	-	kN/m3	kN/m2	C°m

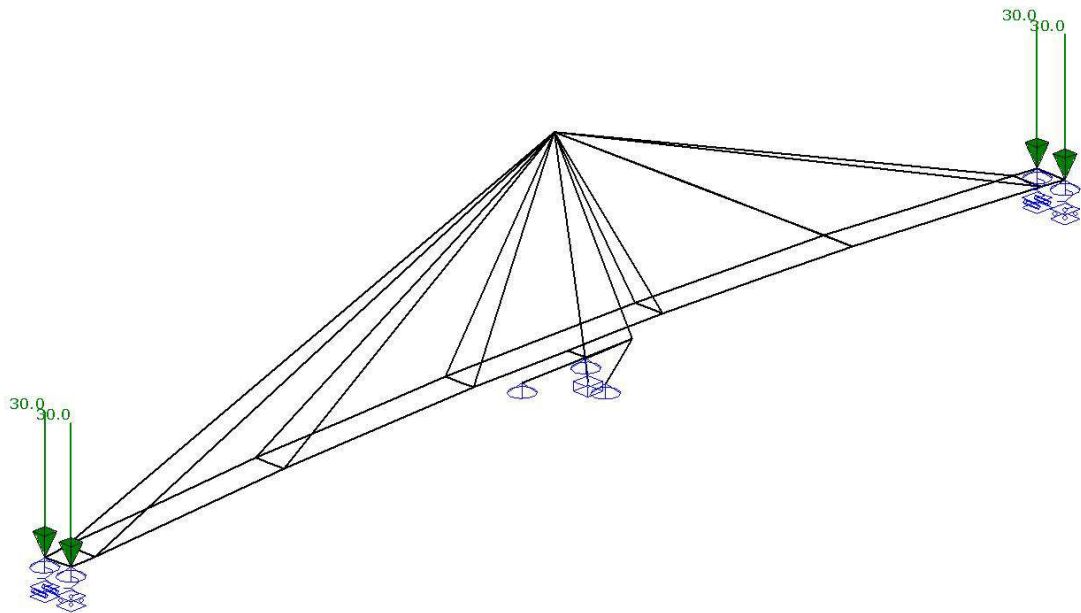
OPLEGGINGEN

Oplegging	Knopen	X	Y	Z	Xr	Yr	Zr	HoekXr	HoekYr	HoekZr
O5	K20	vast	vast	vast	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O6	K21	vast	vast	vast	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O7	K22	vast	vast	vast	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O8	K17	vast	vast	vast	vast	vast	vast	0	0	0
O9	K1	vrij	vrij	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O10	K9	vrij	vast	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O11	K8	vrij	vrij	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
O12	K16	vrij	vast	1000000	vrij	vrij	vrij	0	0	0
-	-	kN/m	kN/m	kN/m	kNmrad	kNmrad	kNmrad	°	°	°

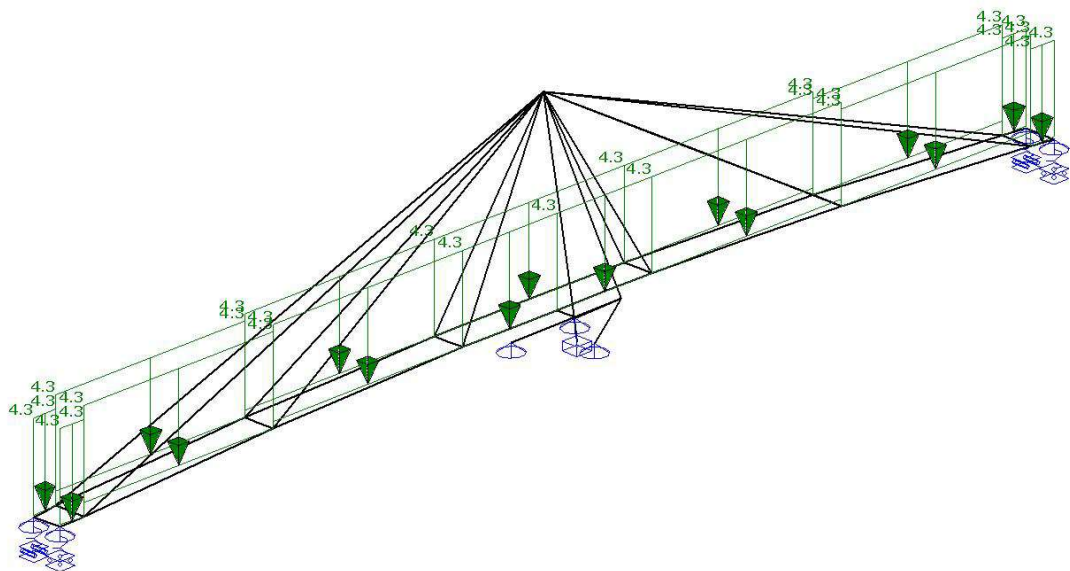
AFB. LASTEN B.G.1 EIGEN GEWICHT BGT



AFB. LASTEN B.G.2 VOORSPANNING LANDHOOFDEN BGT

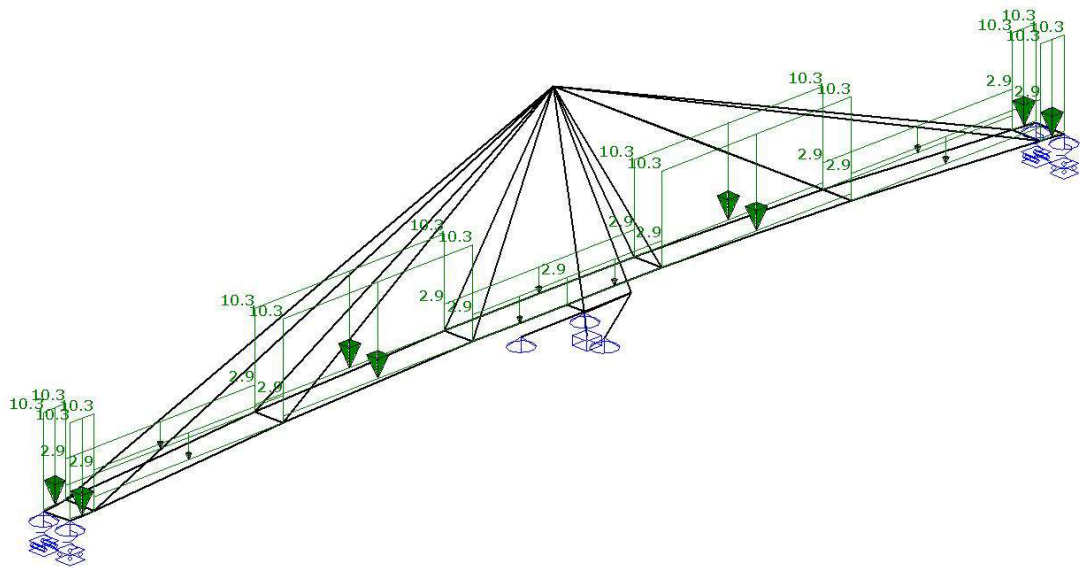


AFB. LASTEN B.G.3 GEHELE DEK BELAST BGT

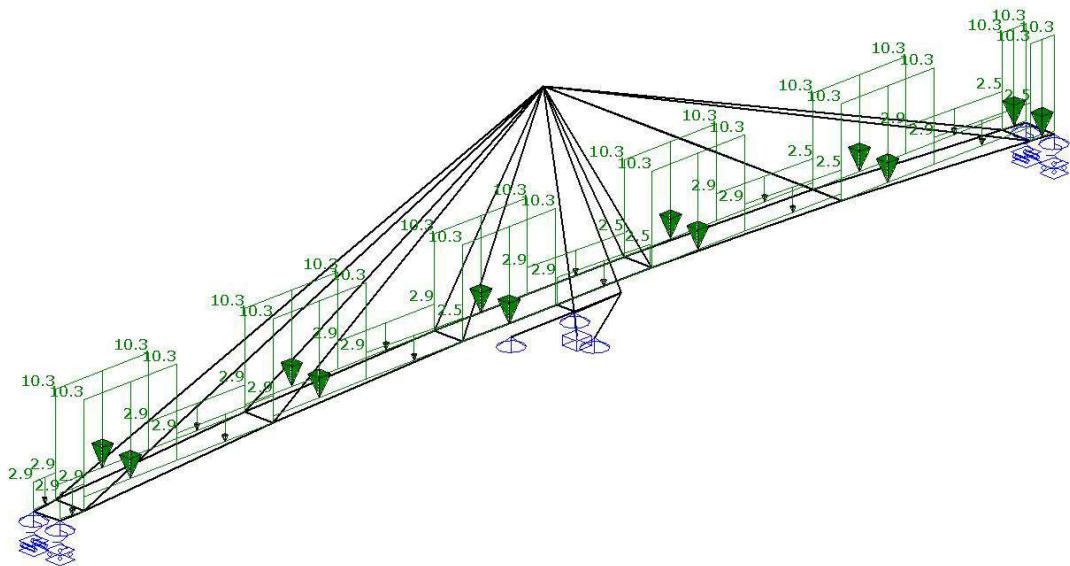




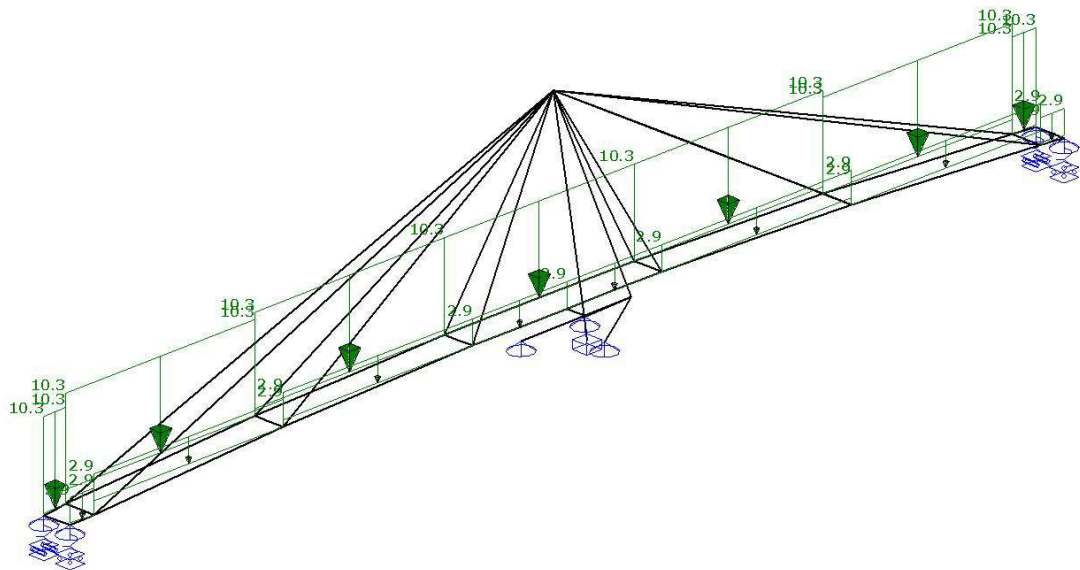
AFB. LASTEN B.G.6 SCHAAKBORD 2 UGT



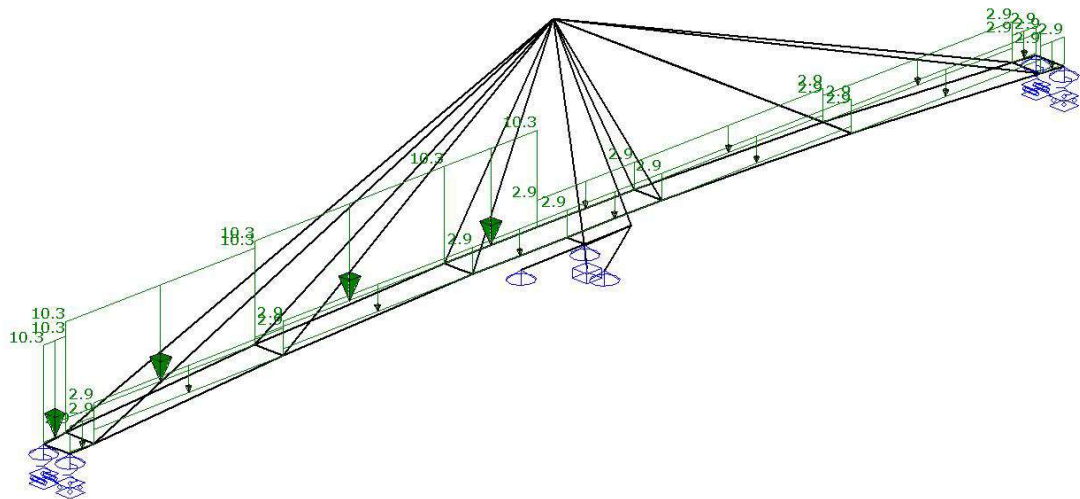
AFB. LASTEN B.G.7 SCHAAKBORD 3 UGT



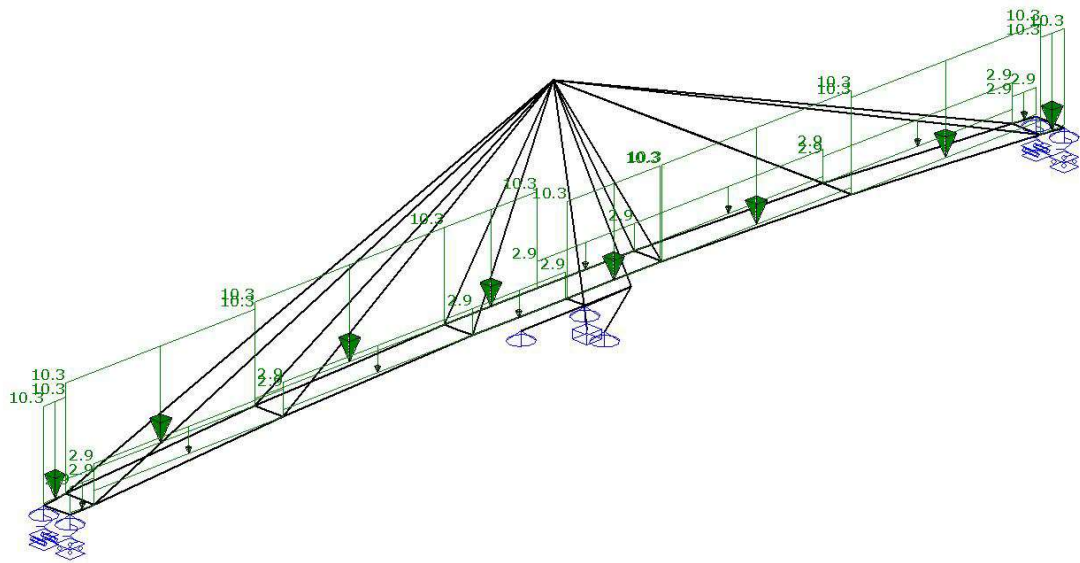
AFB. LASTEN B.G.8 1/2 DEK IN LANGSRICHTING BELAST UGT



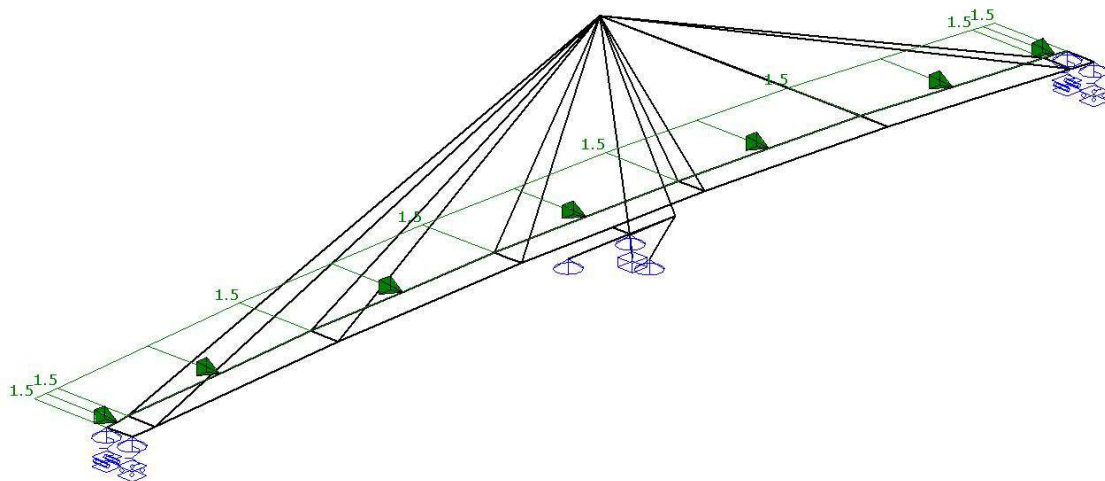
AFB. LASTEN B.G.9 1/4 DEK IN LANGSRICHTING BELAST UGT



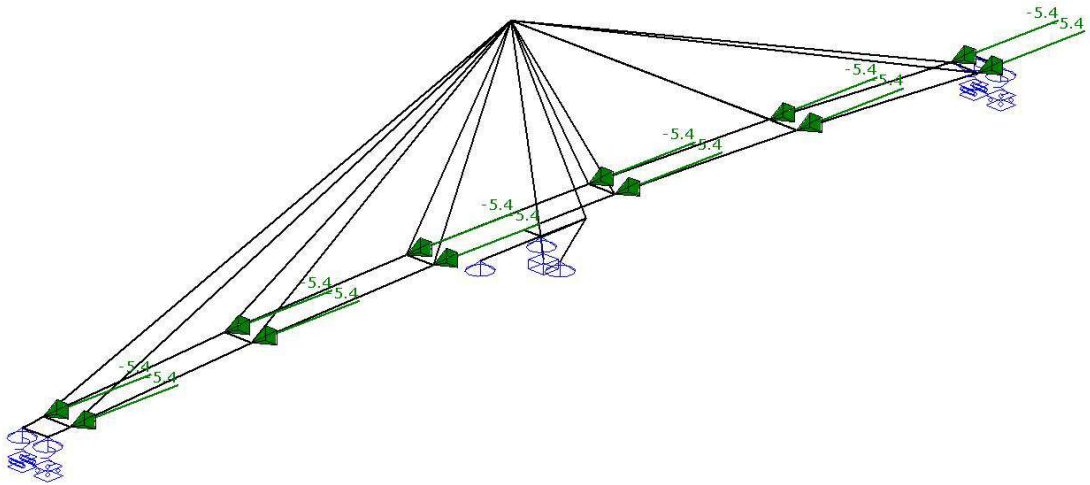
AFB. LASTEN B.G.10 SCHAAKBORD 4 UGT



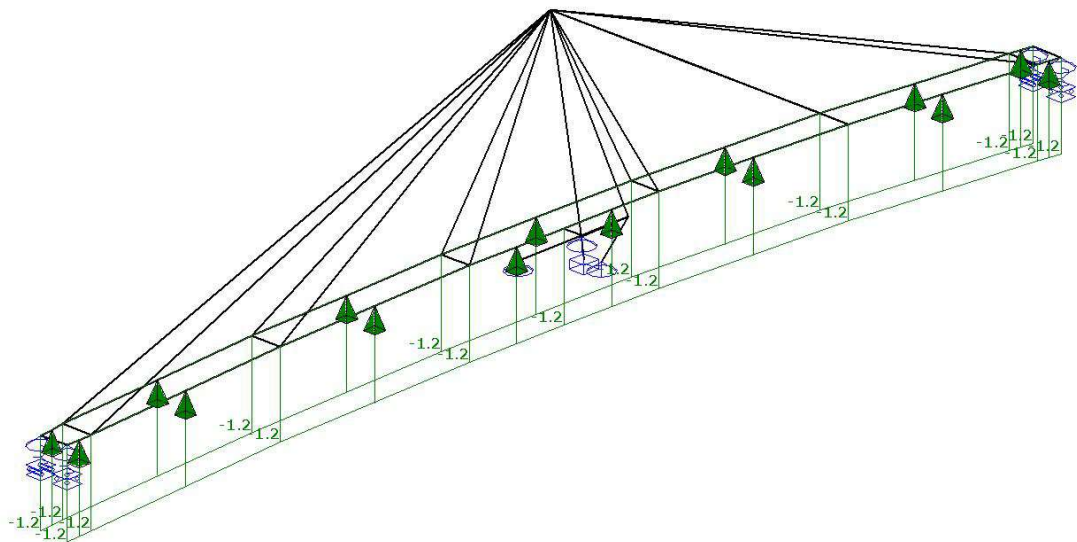
AFB. LASTEN B.G.11 WIND VAN VOOR BGT



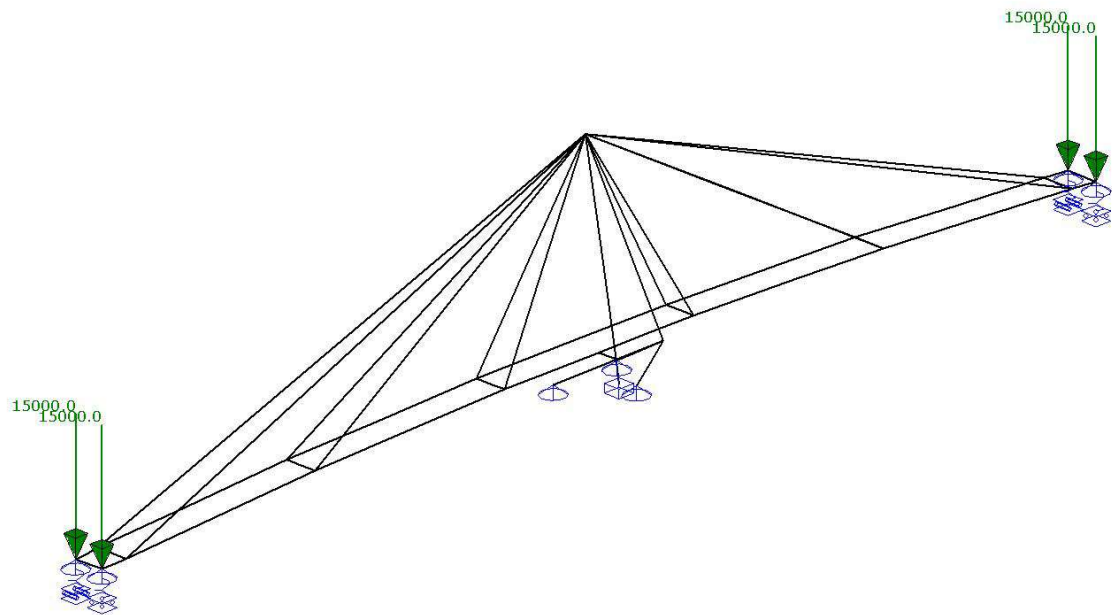
AFB. LASTEN B.G.14 WIND VAN RECHTS BGT



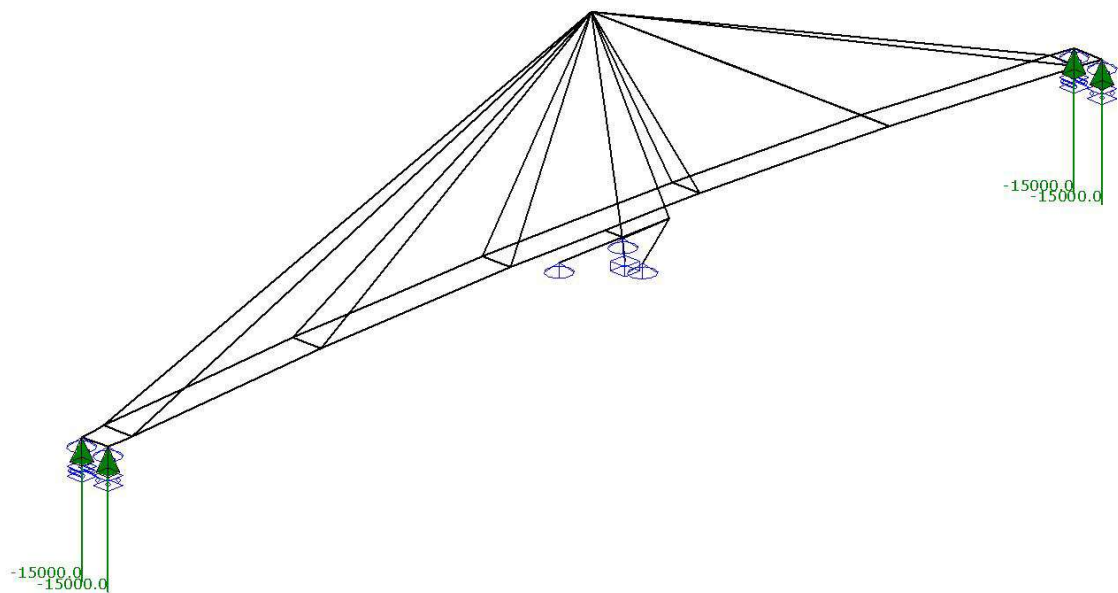
AFB. LASTEN B.G.15 WINDZUIGING BGT



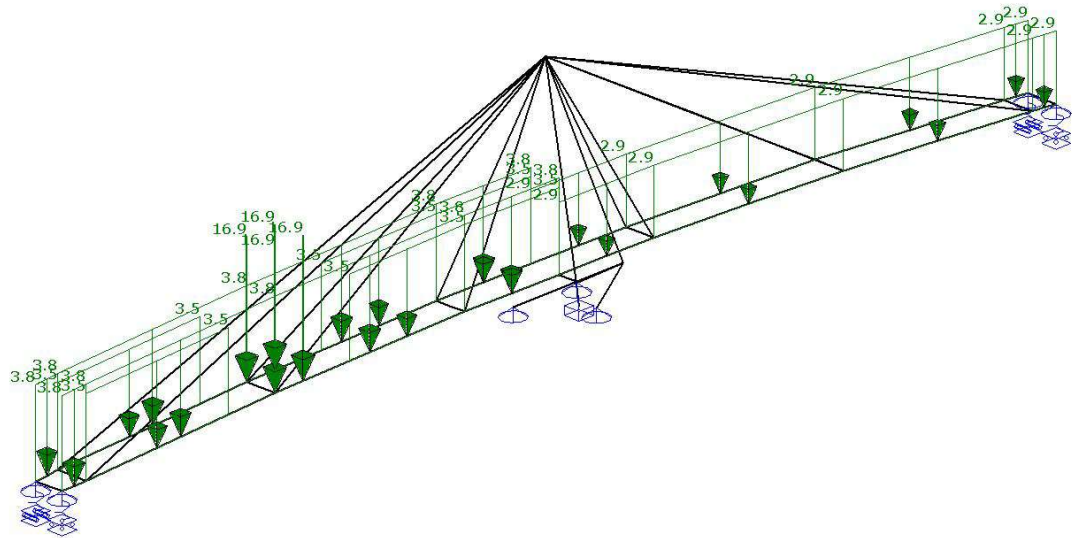
AFB. LASTEN B.G.16 ZETTINGEN PYLOON



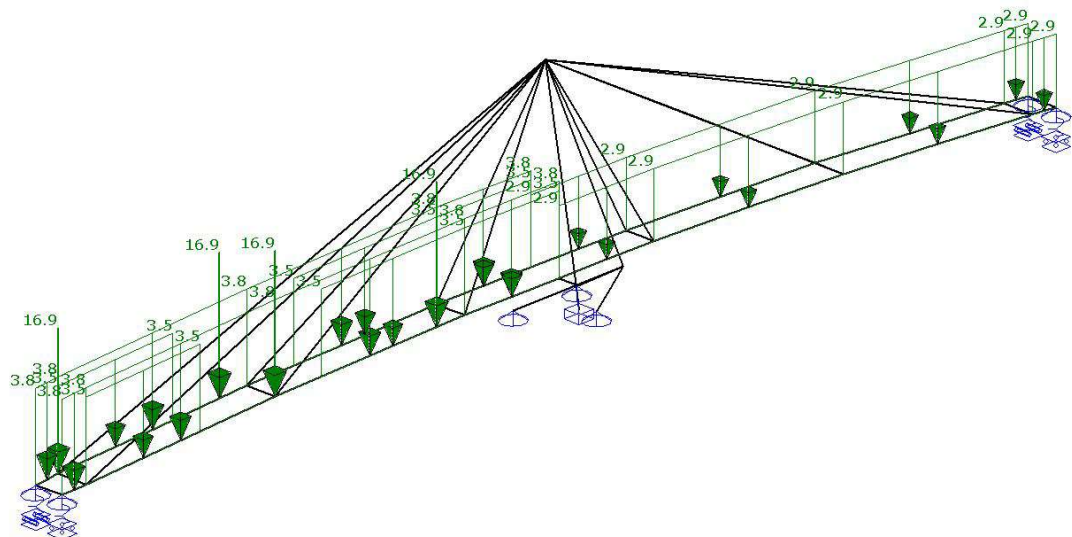
AFB. LASTEN B.G.17 ZETTINGEN LANDHOOFDEN



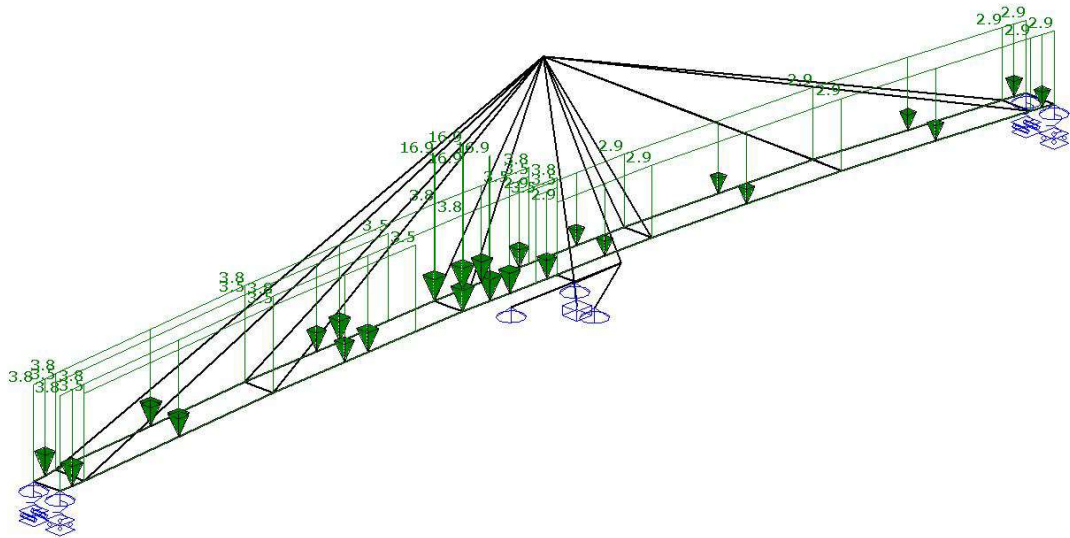
AFB. LASTEN B.G.20 DIENSTVOERTUIG POSITIE 2A



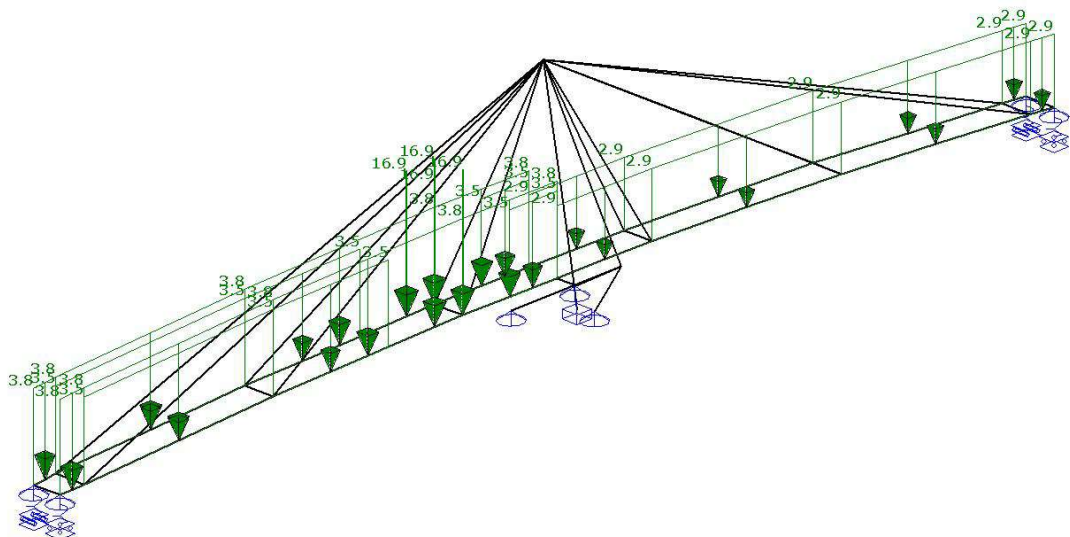
AFB. LASTEN B.G.21 DIENSTVOERTUIG POSITIE 2B



AFB. LASTEN B.G.22 DIENSTVOERTUIG POSITIE 3A



AFB. LASTEN B.G.23 DIENSTVOERTUIG POSITIE 3B



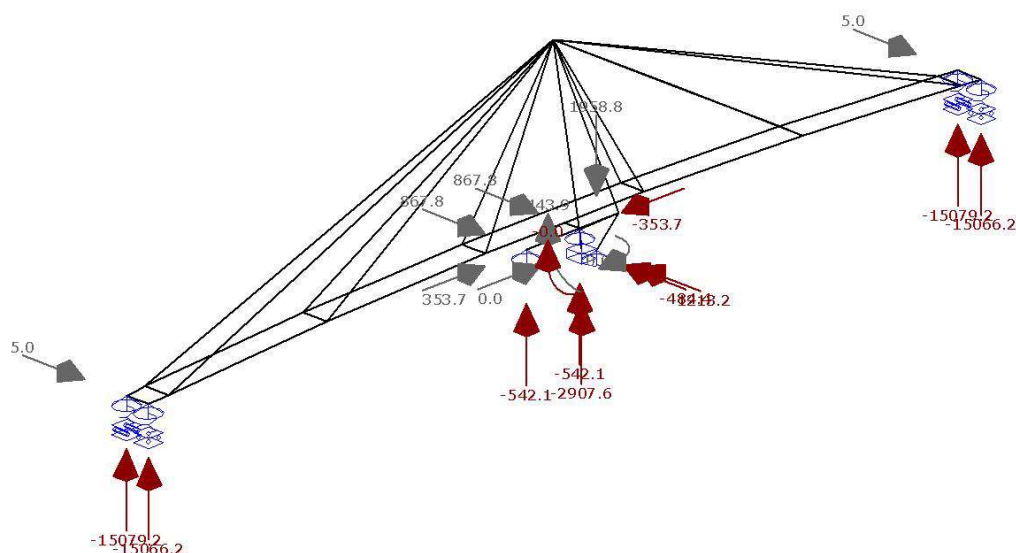
FUNDAMENTEEL BELASTINGSCOMBINATIES (TABEL)

B.G.	Omschrijving	Fu.C.1
B.G.1	Eigen gewicht BGT	1.20
B.G.2	Voorspanning landhoofden BGT	-

B.G.3	gehele dek belast BGT	1.50
B.G.4	1/2 dek belast UGT	-
B.G.5	Schaakbord 1 UGT	-
B.G.6	Schaakbord 2 UGT	-
B.G.7	Schaakbord 3 UGT	-
B.G.8	1/2 dek in langsrichting belast UGT	-
B.G.9	1/4 dek in langsrichting belast UGT	-
B.G.10	Schaakbord 4 UGT	-
B.G.11	Wind van voor BGT	-
B.G.12	Wind van achter BGT	0.30
B.G.13	Wind van links BGT	-
B.G.14	Wind van rechts BGT	-
B.G.15	Windzuiging BGT	-
B.G.16	Zettingen pyloon	1.00
B.G.17	Zettingen landhoofden	-
B.G.18	Temperatuurslast	1.00
B.G.19	Dienstvoertuig positie 1	-
B.G.20	Dienstvoertuig positie 2A	-
B.G.21	Dienstvoertuig positie 2B	-
B.G.22	Dienstvoertuig positie 3A	-
B.G.23	Dienstvoertuig positie 3B	-

AFB. FU.C.1 OPLEGREACTIES

Fundamenteel Belastingscombinaties



FU.C. STAAFKRACHTEN (MY, MZ)

Staaf	B.C.	Waarde	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0
S1	Fu.C.1	My	1.48			137.13	0.000	0.000
		Mz	-9.63			-12.38	0.000	0.000
S2	Fu.C.1	My	138.55	519.86	8.616	-193.22	18.677	0.000
		Mz	-23.80	-33.95	6.717	8.17	19.001	0.000
S3	Fu.C.1	My	-192.80	209.06	8.837	-478.98	2.463	15.210
		Mz	-20.04	-21.21	2.282	52.64	11.992	0.000
S5	Fu.C.1	My	-478.98	209.06	11.563	-192.80	5.189	17.936
		Mz	52.64	-21.21	18.117	-20.04	8.407	0.000
S6	Fu.C.1	My	-193.22	519.86	11.783	138.55	1.722	0.000
		Mz	8.17	-33.95	13.682	-23.80	1.398	0.000
S7	Fu.C.1	My	137.13			1.48	0.000	0.000
		Mz	-12.38			-9.63	0.000	0.000

--	--	--

Staaf	B.C.	Waarde	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0
S8	Fu.C.1	My	-1.48			165.93	0.019	0.000
		Mz	-9.62			-18.27	0.000	0.000
S9	Fu.C.1	My	164.50	549.83	8.662	-157.79	19.008	0.000
		Mz	-29.77			-25.09	0.000	0.000
S10	Fu.C.1	My	-158.20	226.81	8.649	-483.70	2.011	15.288
		Mz	-54.40			100.56	7.162	0.000
S11	Fu.C.1	My	-483.62	52.16	10.200	-483.62	7.017	13.383
		Mz	75.47	75.47	1.000	75.47	0.000	0.000
S12	Fu.C.1	My	-483.70	226.81	11.750	-158.20	5.111	18.388
		Mz	100.56			-54.40	13.238	0.000
S13	Fu.C.1	My	-157.79	549.83	11.738	164.50	1.391	0.000
		Mz	-25.09			-29.77	0.000	0.000
S14	Fu.C.1	My	165.93			-1.48	2.531	0.000
		Mz	-18.27			-9.62	0.000	0.000
S16	Fu.C.1	My	-0.09	-11.59	5.219	0.00	0.000	0.000
		Mz	-0.43			0.00	0.000	0.000
S17	Fu.C.1	My	0.09	11.59	5.219	0.00	0.000	0.000
		Mz	-0.43			0.00	0.000	0.000
S18	Fu.C.1	My	0.00	2.65	8.404	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S19	Fu.C.1	My	0.00	3.22	2.711	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S20	Fu.C.1	My	0.00	-27.66	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	20.198	0.00	0.000	0.000
S21	Fu.C.1	My	0.00	-10.86	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	16.289	0.00	0.000	0.000
S22	Fu.C.1	My	0.00	-2.09	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S23	Fu.C.1	My	0.00	2.09	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S24	Fu.C.1	My	0.00	10.86	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	21.379	0.00	0.000	0.000
S25	Fu.C.1	My	0.00	27.66	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	40.397	0.00	0.000	0.000
S26	Fu.C.1	My	0.00	27.66	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	38.377	0.00	0.000	0.000
S27	Fu.C.1	My	0.00	10.86	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	17.307	0.00	10.181	25.452
S28	Fu.C.1	My	0.00	2.09	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S29	Fu.C.1	My	0.00	-2.09	10.212	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S30	Fu.C.1	My	0.00	-10.86	17.816	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	17.307	0.00	0.000	0.000
S31	Fu.C.1	My	0.00	-27.66	27.268	0.00	0.000	0.000
		Mz	0.00	0.00	24.238	0.00	0.000	0.000
S32	Fu.C.1	My	0.32			-0.33	1.498	0.000
		Mz	9.63			-9.64	1.499	0.000
S33	Fu.C.1	My	0.49			-0.58	1.374	0.000
		Mz	11.49			-11.41	1.505	0.000
S34	Fu.C.1	My	0.35			-1.26	0.646	0.000
		Mz	29.32			-28.18	1.530	0.000
S35	Fu.C.1	My	2.87			-1.51	1.966	0.000
		Mz	25.04			-29.85	1.369	0.000
S36	Fu.C.1	My	2.87			-1.51	1.966	0.000
		Mz	-25.04			29.85	1.369	0.000
S37	Fu.C.1	My	0.35			-1.26	0.646	0.000
		Mz	-29.32			28.18	1.530	0.000
S38	Fu.C.1	My	0.49			-0.58	1.374	0.000
		Mz	-11.49			11.41	1.505	0.000
S39	Fu.C.1	My	0.32			-0.33	1.498	0.000
		Mz	-9.63			9.64	1.499	0.000
S42	Fu.C.1	My	0.00			0.00	0.183	0.366
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000

--	--	--

Staaf	B.C.	Waarde	Mb	Mmax	xMmax	Me	x-M0	x-M0
S43	Fu.C.1	My	-443.93			-318.85	0.000	0.000
		Mz	0.00			0.00	0.000	0.000
S44	Fu.C.1	My	-318.85			0.02	17.940	0.000
		Mz	0.00	0.00	16.916	0.00	0.000	0.000
S45	Fu.C.1	My	-479.05			56.73	6.881	0.000
		Mz	22.77			208.31	0.000	0.000
S46	Fu.C.1	My	56.73			-479.05	3.319	0.000
		Mz	208.31			22.77	0.000	0.000
-	-	-	kNm	kNm	m	kNm	m	m

FU.C. STAAFKRACHTEN (NX, VY, VZ, MX)

Staaf	B.C.	T/D	Nmax	Waarde	Vb	Vmax	Ve	Mxb	Mxe
S1	Fu.C.1	T	3.50	Vz	66.27	66.27	40.12	-0.38	-0.38
				Vy	-1.65	-1.65	-0.50		
S2	Fu.C.1	D	-147.87	Vz	88.51	-121.04	-121.04	-0.25	-0.25
				Vy	-3.02	6.16	6.16		
S3	Fu.C.1	D	-495.93	Vz	90.95	-119.01	-119.01	-0.02	-0.02
				Vy	-1.03	8.15	8.15		
S5	Fu.C.1	D	-495.93	Vz	119.01	119.01	-90.95	0.02	0.02
				Vy	-8.15	-8.15	1.03		
S6	Fu.C.1	D	-147.87	Vz	121.04	121.04	-88.51	0.25	0.25
				Vy	-6.16	-6.16	3.02		
S7	Fu.C.1	T	3.50	Vz	-40.12	-66.27	-66.27	0.38	0.38
				Vy	0.50	1.65	1.65		
S8	Fu.C.1	D	-12.20	Vz	78.73	78.73	52.58	-0.38	-0.38
				Vy	-3.39	-3.39	-3.39		
S9	Fu.C.1	D	-138.61	Vz	88.97	-120.57	-120.57	-0.25	-0.25
				Vy	0.23	0.23	0.23		
S10	Fu.C.1	D	-521.21	Vz	89.03	-120.94	-120.94	-0.02	-0.02
				Vy	7.60	7.60	7.60		
S11	Fu.C.1	D	-658.64	Vz	105.06	105.06	-105.06	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S12	Fu.C.1	D	-521.21	Vz	120.94	120.94	-89.03	0.02	0.02
				Vy	-7.60	-7.60	-7.60		
S13	Fu.C.1	D	-138.61	Vz	120.57	120.57	-88.97	0.25	0.25
				Vy	-0.23	-0.23	-0.23		
S14	Fu.C.1	D	-12.20	Vz	-52.58	-78.73	-78.73	0.38	0.38
				Vy	3.39	3.39	3.39		
S16	Fu.C.1	D	-1082.65	Vz	-4.41	4.42	4.42	0.00	0.00
				Vy	0.04	0.04	0.04		
S17	Fu.C.1	D	-1082.65	Vz	4.41	-4.42	-4.42	0.00	0.00
				Vy	0.04	0.04	0.04		
S18	Fu.C.1	T	1046.19	Vz	0.63	-0.63	-0.63	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S19	Fu.C.1	T	2311.71	Vz	2.37	-2.37	-2.37	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S20	Fu.C.1	T	128.42	Vz	-2.03	2.03	2.03	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S21	Fu.C.1	T	427.02	Vz	-1.22	1.22	1.22	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S22	Fu.C.1	T	244.72	Vz	-0.41	-0.41	0.41	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S23	Fu.C.1	T	244.72	Vz	0.41	0.41	-0.41	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S24	Fu.C.1	T	427.02	Vz	1.22	1.22	-1.22	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S25	Fu.C.1	T	128.42	Vz	2.03	-2.03	-2.03	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S26	Fu.C.1	T	168.42	Vz	2.03	-2.03	-2.03	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S27	Fu.C.1	T	431.36	Vz	1.22	1.22	-1.22	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S28	Fu.C.1	T	246.71	Vz	0.41	0.41	-0.41	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S29	Fu.C.1	T	246.71	Vz	-0.41	-0.41	0.41	0.00	0.00
				Vy	0.00	0.00	0.00		
S30	Fu.C.1	T	431.36	Vz	-1.22	-1.22	1.22	0.00	0.00

Staat	B.C.	T/D	Nmax Waarde	Vb	Vmax	Ve	Mxb	Mxe
S31	Fu.C.1	T	Vy	0.00	0.00	0.00		
			168.42 Vz	-2.03	2.03	2.03	0.00	0.00
S32	Fu.C.1	D	Vy	0.00	0.00	0.00		
			-1.65 Vz	-0.22	-0.22	-0.22	1.48	1.48
S33	Fu.C.1	D	Vy	-6.42	-6.42	-6.42		
			-7.13 Vz	-0.36	-0.36	-0.36	1.43	1.43
S34	Fu.C.1	D	Vy	-7.63	-7.63	-7.63		
			-25.31 Vz	-0.54	-0.54	-0.54	0.42	0.42
S35	Fu.C.1	D	Vy	-19.17	-19.17	-19.17		
			-10.33 Vz	-1.46	-1.46	-1.46	-0.08	-0.08
S36	Fu.C.1	D	Vy	-18.30	-18.30	-18.30		
			-10.33 Vz	-1.46	-1.46	-1.46	0.08	0.08
S37	Fu.C.1	D	Vy	18.30	18.30	18.30		
			-25.31 Vz	-0.54	-0.54	-0.54	-0.42	-0.42
S38	Fu.C.1	D	Vy	19.17	19.17	19.17		
			-7.13 Vz	-0.36	-0.36	-0.36	-1.43	-1.43
S39	Fu.C.1	D	Vy	7.63	7.63	7.63		
			-1.65 Vz	-0.22	-0.22	-0.22	-1.48	-1.48
S42	Fu.C.1	T	Vy	6.42	6.42	6.42		
			40.97 Vz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S43	Fu.C.1	D	Vy	0.00	0.00	0.00		
			-2947.00 Vz	64.25	64.25	63.30	0.00	0.00
S44	Fu.C.1	D	Vy	0.00	0.00	0.00		
			-2949.59 Vz	22.12	22.12	13.43	0.00	0.00
S45	Fu.C.1	D	Vy	0.00	0.00	0.00		
			-597.71 Vz	105.06	105.06	0.00	0.00	0.00
S46	Fu.C.1	D	Vy	15.90	20.49	20.49		
			-597.71 Vz	0.00	-105.06	-105.06	0.00	0.00
-	-	-	Vy	-20.49	-20.49	-15.90		
			kN -	kN	kN	kN	kNm	kNm