

Tafelbrug Aduard is de derde brug over het Van Starckenborghkanaal die vervangen is in het kader van de opwaardering van de vaarweg Lemmer-Delzijl. Tafelbrug Dorkwerd was de eerste in de reeks, daarna volgde de brug bij Zuidhorn en tenslotte dus Aduard. De ervaring die werd opgedaan bij de eerste en tweede brug, is bij de daar opvolgende brug benut om tot een verbeterd uitvoeringsontwerp te komen.

De provincie Fryslân, provincie Groningen en Rijkswaterstaat hebben samen gewerkt aan het verbeteren van de Hoofdvaarweg Lemmer-Delfzijl. Om vlot en veilig klasse V-schepen te kunnen laten passeren op het Van Starckenborghkanaal, is gewerkt aan het verbreden van de gehele hoofdvaarweg. In dit kader zijn ook drie bestaande bruggen vervangen door drie nieuwe tafelbruggen. De eerste brug (Dorkwerd) is een boogbrug met hangers, waarbij vanuit het esthetisch programma van eisen ook een 'contraboog' met 'toegangspoort' is voorgeschreven.

Bij de bruggen van Zuidhorn en Aduard is voor een soberder architectonisch ontwerp is gekozen, zodat de staalconstructie van deze bruggen efficiënter is uitgevoerd. Ondanks dat de bruggen breder zijn dan bij Dorkwerd, zijn ze niet zwaarder geworden.

De voornaamste redenen om voor een tafelbrug te kiezen waren als volgt.

- Met een tafelbrug kan eenvoudig een grote overspanning worden gerealiseerd. De doorvaartbreedte moest 54 m worden, waarbij de bruggen de gehele vaarwegbreedte overspannen. Het grote voordeel hiervan is dat schepen elkaar onder de brug kunnen passeren en niet op elkaar hoeven te wachten. De brug staat hierdoor minder lang open en de schepen kunnen met dezelfde snelheid blijven doorvaren.
- Bij een tafelbrug is de doorvaarthoogte beperkt. Vanwege een aantal hoge vaste bruggen is onbeperkte doorvaarthoogte bij geopende brug niet noodzakelijk. De doorvaarthoogte is in geopende stand uitgelegd op 9,1 m, zodat de schepen de bruggen kunnen passeren met vier lagen containers.
- De bouwruimte aan beide zijden van het kanaal is bij een aantal bruggen vanwege bebouwing of cultuurhistorisch landschap beperkt. Bij een tafelbrug zijn relatief kleine brugkelders nodig, zodat dit makkelijker inpasbaar.
- Vanwege het vlakke landschap om de dorpen was het niet wenselijk om hoge hamei- of heftorens en dergelijke bij de brug te hebben.

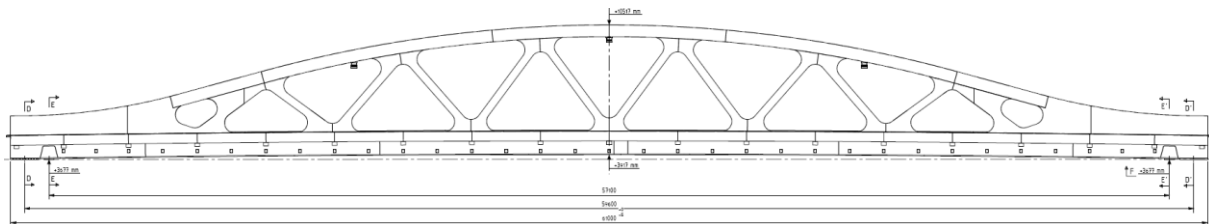


Figuur 1: Tafelbrug Aduard

Bij Tafelbrug Aduard vindt de aandrijving plaats met behulp van hydraulische cilinders.

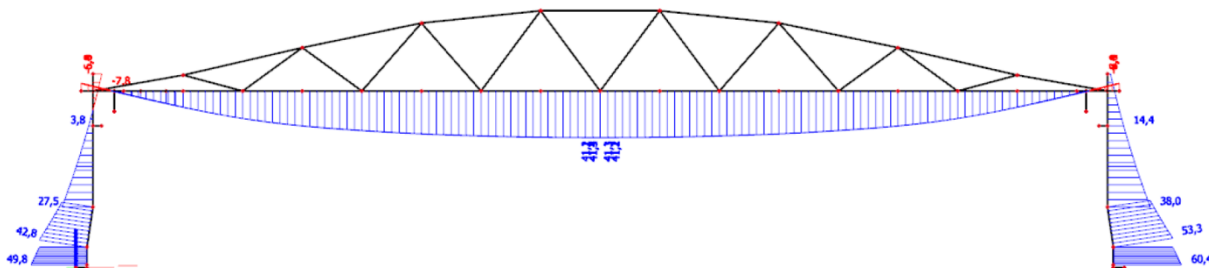
Vakwerkbrug

De hoofdo overspanning van de brug Aduard bestaat uit twee vakwerkliggers waarbij de onderregel in het brugdek is geïntegreerd en de bovenregel een gebogen vorm heeft. Bij de opleggingen komen onder- en bovenregel samen, daartussen zitten diagonale wandstaven. Vanuit het architectonisch ontwerp heeft de boog bij de booggeboortes een langere 'aanzet' gekregen dan bij Dorkwerd het geval was. Het lange aansluitvlak van de booggeboortes met het brugdek en de ruime afrondingen tussen boog, dek en diagonalen geven een goede krachtsinleiding van de normaalkracht uit de boog aan het dek. De plaatdiktes van de booggeboorte konden hierdoor relatief dun worden gekozen.



Figuur 2: Zijaanzicht vakwerkbrug Aduard

Een vormgevingseis was dat het brugdek in de gebruikssituatie een kromming heeft met een straal $R = 2500$ m. Om deze straal te bereiken was niet alleen compensatie (toog) nodig voor de doorbuiging van vakwerkliggers maar ook voor de excentrisch aangrijpende contragewichtskabels.



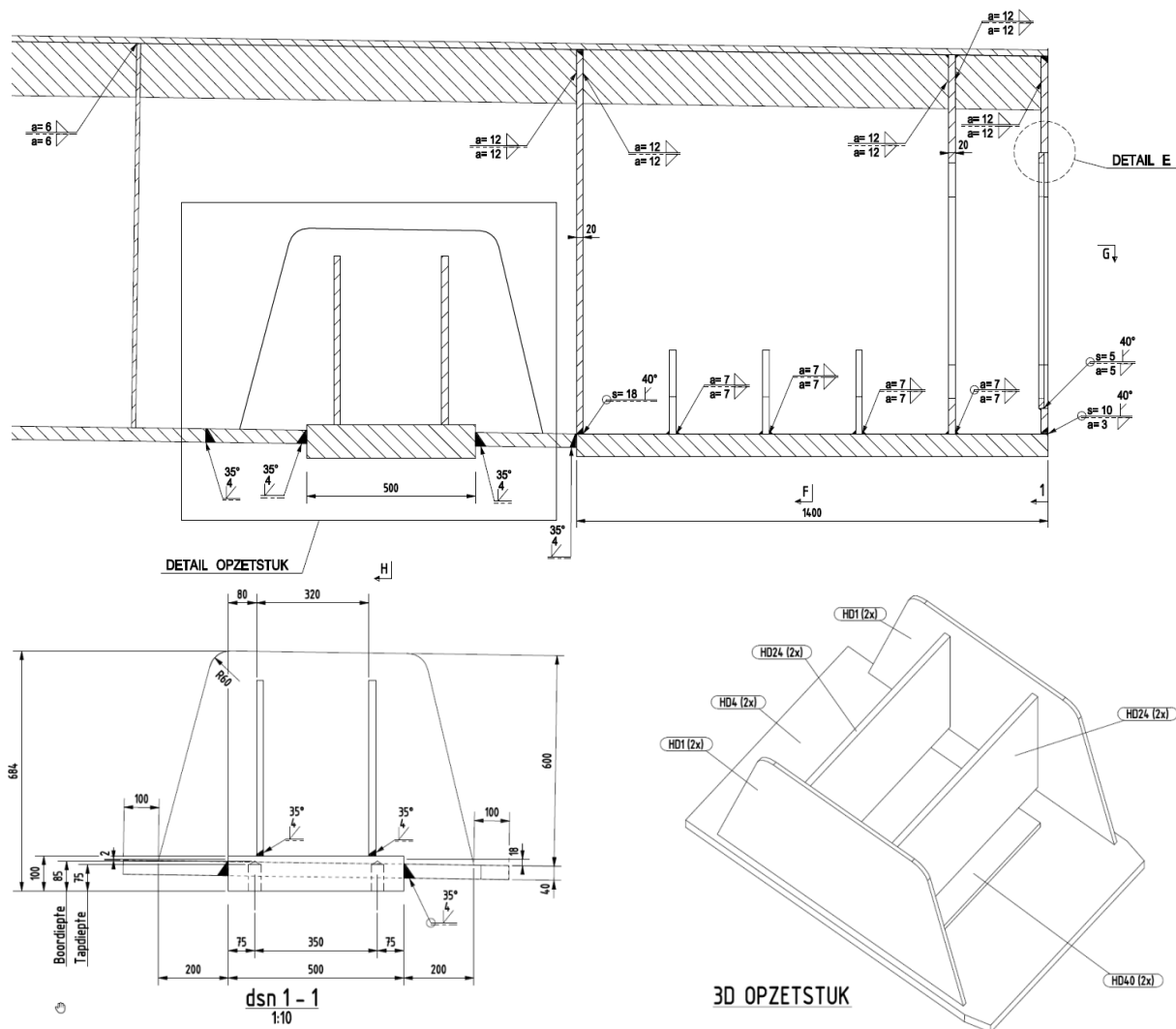
Figuur 3: doorbuiging brug door permanente belastingen

Op basis van de berekende vervormingen, is gekozen voor een kromming in de bouwphase van $R = 2000$ m.

Opleggingen

De vier opleggingen van de brug hebben verschillende bewegingsvrijheden. Met de gekozen configuratie wordt beoogd dat de brug in lengte- en dwarsrichting plaatsvast is; tegelijkertijd dient verhinderd te worden dat effecten (o.a. vervormingen door mobiele lasten en temperatuursveranderingen) beperkt te blijven. Dit is gerealiseerd door op beide landhoofden in dwarsrichting van de brug één oplegging 'vast' en één oplegging 'los' te ontwerpen en in lengterichting van de brug de opleggingen op het noorderhoofd 'vast' en op het zuiderhoofd 'los' te ontwerpen.

De onderzadels zijn met een boutverbinding aan de kokerliggers van de brug bevestigd. In de kokerligger van de brug zijn boven de oplegstoelen verstijvingsschotten en een verdikte voetplaat nodig ten behoeve van de krachtsinleiding. Ter vereenvoudiging van de uitvoering, is ervoor gekozen dit deel van de kokerligger als een los 'opzetstuk' te vervaardigen en dat als één geheel in de koker te lassen.



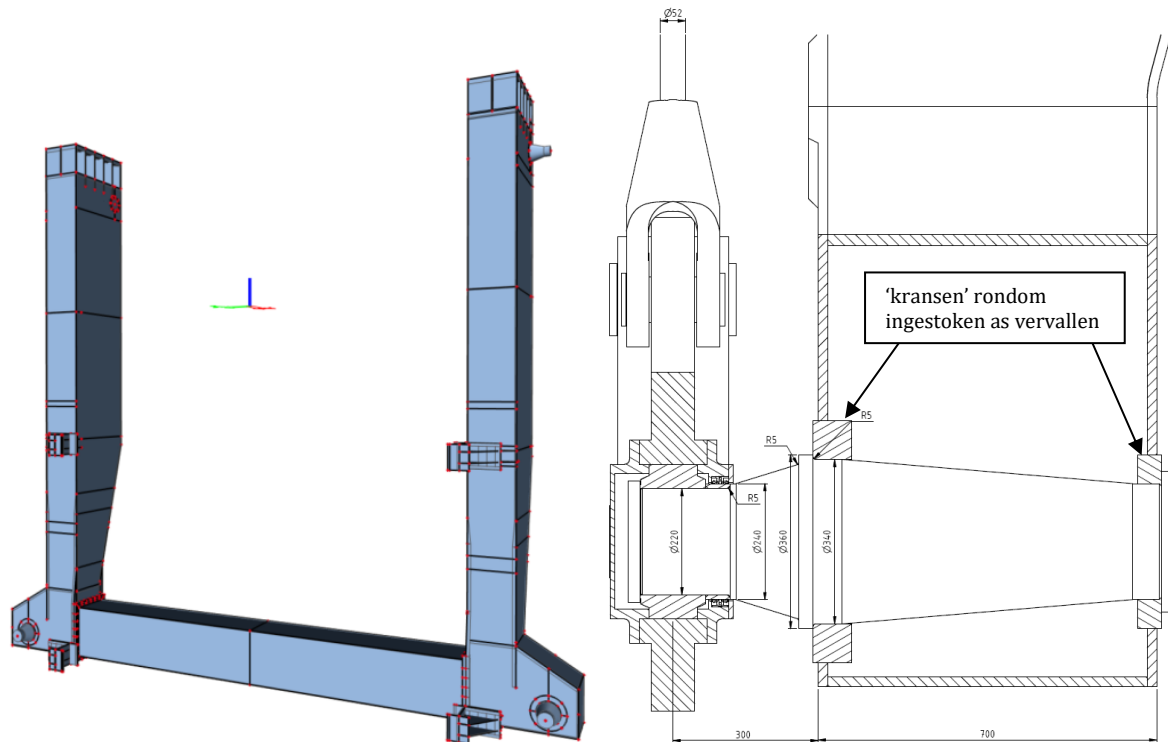
Figuur 4: 'Opzetstuk' oplegging (onder) gelast in hoofdligger (boven)

Footconstructie

De voetconstructie bestaat uit een tweetal poten die middels een boutverbinding aan de hoofdliggers van het val zijn gekoppeld en onderin met elkaar zijn verbonden met een koppelbalk. Deze koppelbalk is ook door middel van boutverbindingen aan de poten verbonden. Alle boutverbindingen zijn voorgespannen en leveren daarmee starre koppelingen.

De vormgeving van de voetconstructie was in het bestek al vastgelegd, alsook een aanzet voor de plaatdikten op globaal niveau. Vanuit de detaillering en de plooiestabiliteit zijn definitieve plaatdiktes gekozen.

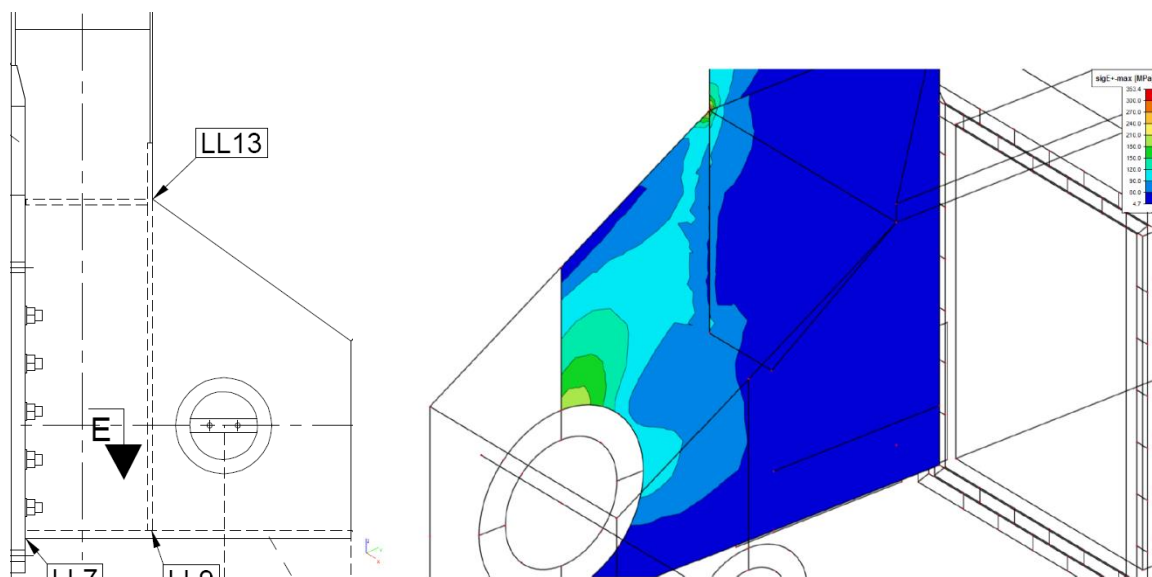
Omwille van uitvoeringstechnische vereenvoudigingen, zijn in de UO-fase enkele constructieve aanpassingen doorgevoerd. Zo is aangetoond dat verdikte kranen in de wandplaten van de pot rondom de ingestoken assen niet noodzakelijk zijn waardoor deze zijn komen te vervallen.



Figuur 5: Pootconstructie (links) - ingestoken as in 'voet' (rechts)

Ten tweede is het aansluitprincipe van het 'been' met de 'voet' vereenvoudigd. In het DO-ontwerp is de verticale plaat aan 'scheenbeenzijde' doorgezet in de voet om de grote spanningsconcentraties bij de overgang in te kunnen leiden. Dit principe zou leiden tot een volledig doorgelaste verbinding van de staalplaten met dikten van 40 mm.

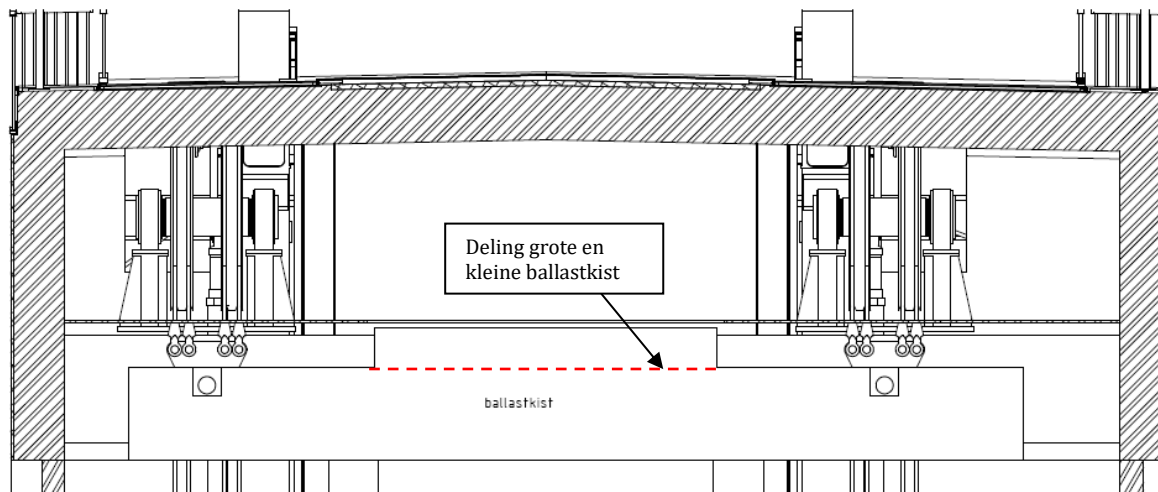
Om impact van het constructief detailontwerp op het laswerk te beperken, is ervoor gekozen om het schot aan de onderzijde te verjongen en minder ver in de voet door te laten lopen. Zie hieronder een fragment van de pootconstructie met het doorlopende schot (links = DO-oplossing) en een fragment uit het EEM-model met daarin de geoptimaliseerde vorm van het schot (rechts = UO-oplossing).



Figuur 6: voet met doorgaande 'scheenbeenplaat' (links) en in geoptimaliseerde uitvoering (rechts)

Ballastkist

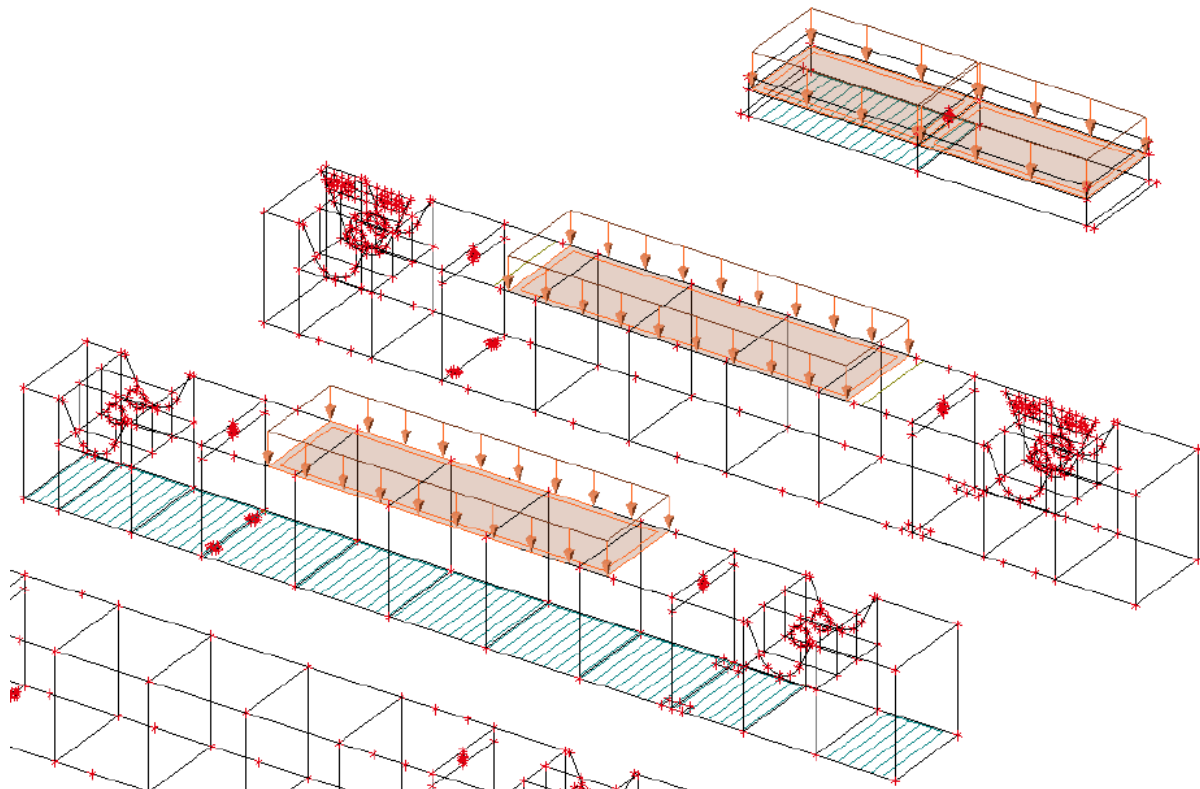
De vorm van de ballastkist van Tafelbrug Aduard is afwijkend vanwege beperkt beschikbare ruimte onder het kelderdek van de brugkelders en het asymmetrische dwarsprofiel van het brugdek. Omdat te weinig hoogte beschikbaar is om de kist als een rechthoekige kokervorm te kunnen voorzien van voldoende ballast, is extra volume toegevoegd door de kist in het midden (tussen de bevestigingspunten van de kabels) hoger uit te voeren. Deze vorm werkt echter constructief nadelig omdat in de scherpe hoeken - bij de overgang van het lagere naar het hogere deel - hoge geconcentreerde spanningen optreden. Om deze pieken te elimineren, is ervoor gekozen om de ballastkist op te delen in een grote rechthoekige ballastkist en een kleine 'ballastkist / -bak', die los op de kist is geplaatst. In deze bak is de regelballast geplaatst.



Figuur 7: 'Snijlijn' ballastkist ten behoeve van opdeling

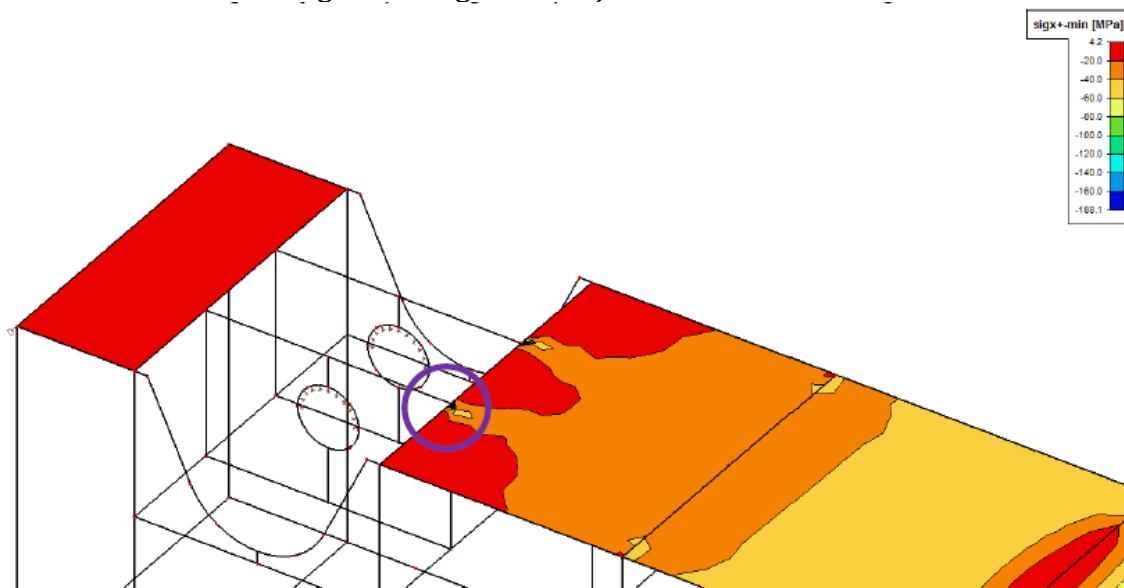
De ballastkist is (met één EEM-model) beschouwd op twee situaties:

- Tijdelijke situatie: kist staat op (permanent aanwezige) steunbokken (oplegpunten aan onderzijde op ca. $1/5$ en $3/4$ van de kistlengte). Deze situatie treedt op tijdens de bouwfase en wanneer de kabels worden vervangen.
- Gebruikssituatie: kist hangt aan de kabels (oplegpunten aan bovenzijde op ca. $1/12$ en $5/6$ van de kistlengte).



Figuur 8: Twee belastingsituaties ballastkist getoetst in één EEM-model

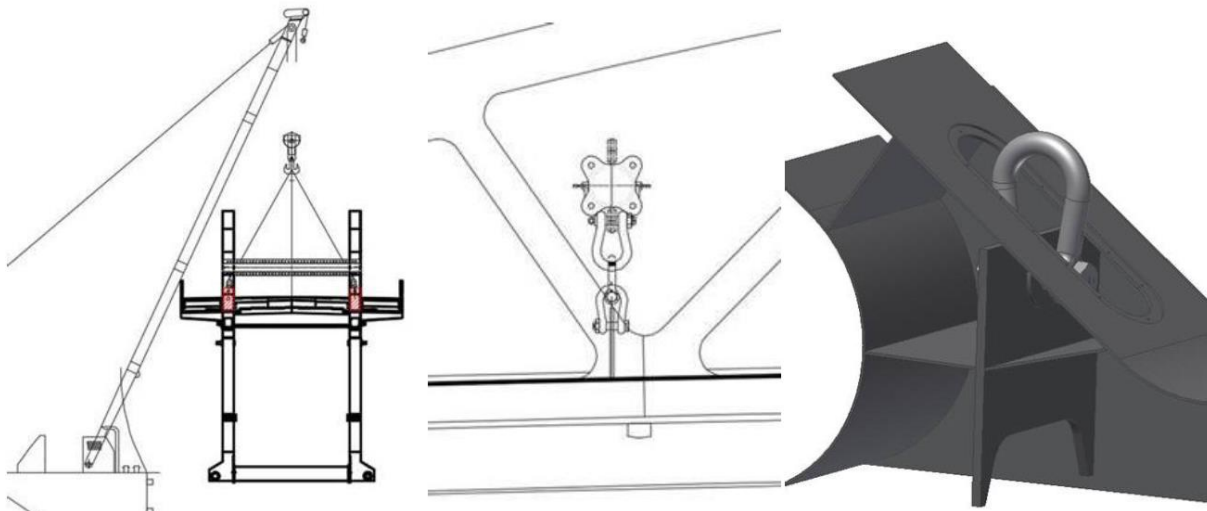
Alhoewel met het opdelen van de ballastkist de grootste piekspanningen zijn weggenomen, is nog wel een verjonging aanwezig in de kist ten behoeve van de kabelbevestigingen. Piekspanningen zijn hier beheerst door de wandplaten van de kist ter plaatse van de verjonging te voorzien van een afronding en door de ruimte tussen de oogplaten en de bovenplaat van de kist uit te vullen met een volledige doorlassing. De druk die in de bovenplaat aanwezig is, wordt via de las overgedragen aan de oogplaten, zodat de drukzone over de gehele lengte kan blijven functioneren.



Figuur 9: drukspanning in doorlassingen tussen bovenplaat kist en oogplaten

Bouwfaserings

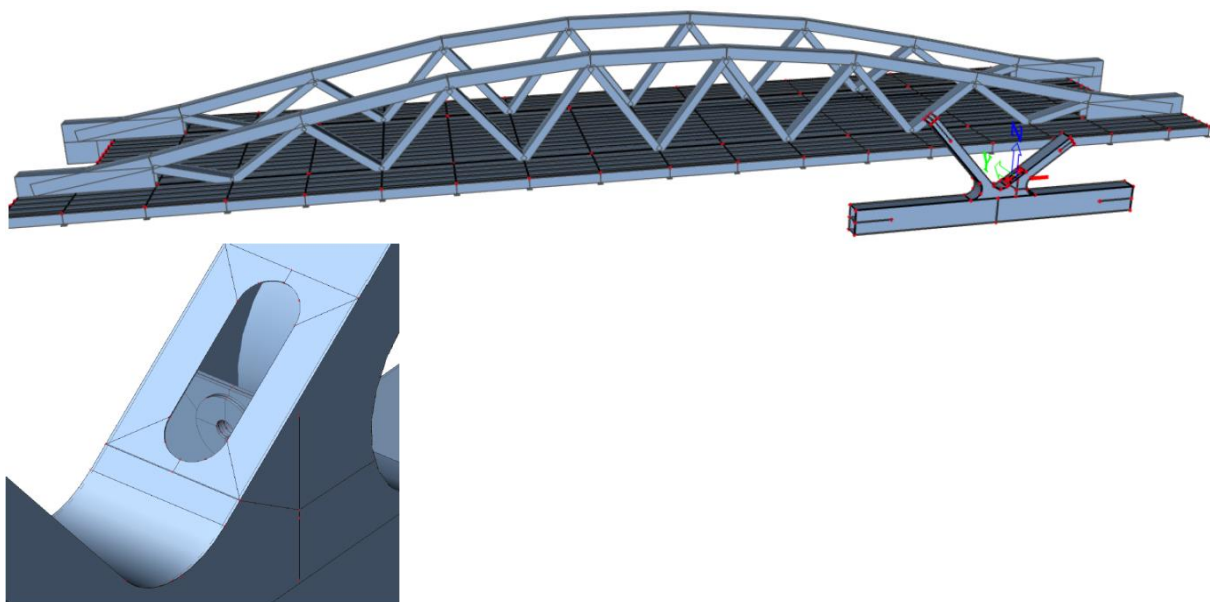
Voordat de brugkelders zijn voorzien van het kelderdek, zijn de ballastkist, aandrijving en pootconstructies in de kelders geplaatst. De vakwerkbrug is, na het storten van het kelderdek, naar de locaties gevaren en ingehesen op de pootconstructies. Voor het transport zijn vier hijspunten aangebracht in de hoofdliggers van de brug.



Figuur 10: hijs oog in knooppunt van vakwerkdiagonalen en hoofdligger

In de vakwerkconstructies zijn schotten ingelast met hijsogen. Deze hijsogen zijn te benaderen via een sparing in de vakwerkconstructie, zodat een hijschalm kan worden aangebracht.

Om de hijskrachten in de hijspunten te kunnen berekenen, is de boogconstructie van het val gemodelleerd met 1D-staven en het dek als plaat met ribben, waarbij opleggingen zijn ingevoerd bij de hijspunten. Van een knoop met hijspunt is een gedetailleerd model met 2D-elementen opgebouwd. De staafkrachten uit het 1D-stavenmodel zijn overgebracht op het 2D-platenmodel.



Figuur 11: 1D-stavenmodel van het val met een knoop in 2D-plaatelementen

Werden de eerste 2 bruggen op dezelfde plaats vervangen Tafelbrug Aduard is op circa 800 m afstand van de bestaande brug gebouwd.