



Oplossing voor capaciteitsprobleem Twee nieuwe boogbruggen Theemswegtracé

Thomassentunnel in aanleg (Bron: André Klarenbeek)

De Havenspoorlijn, het eerste deel van de Betuweroute, wordt over een lengte van ongeveer vier kilometer verlegd. Dankzij het nieuwe stuk spoor, het Theemswegtracé, gaat de spoorlijn niet langer over de Calandbrug en zitten het toenemende scheepvaart- en spoorverkeer elkaar vanaf 2020 niet langer in de weg. Havenbedrijf Rotterdam heeft advies- en ingenieursbureau Movares opdracht gegeven voor het ontwerp van twee boogbruggen in het Theemswegtracé: de brug over de Thomassentunnel en de brug over de Rozenburgsesluis.

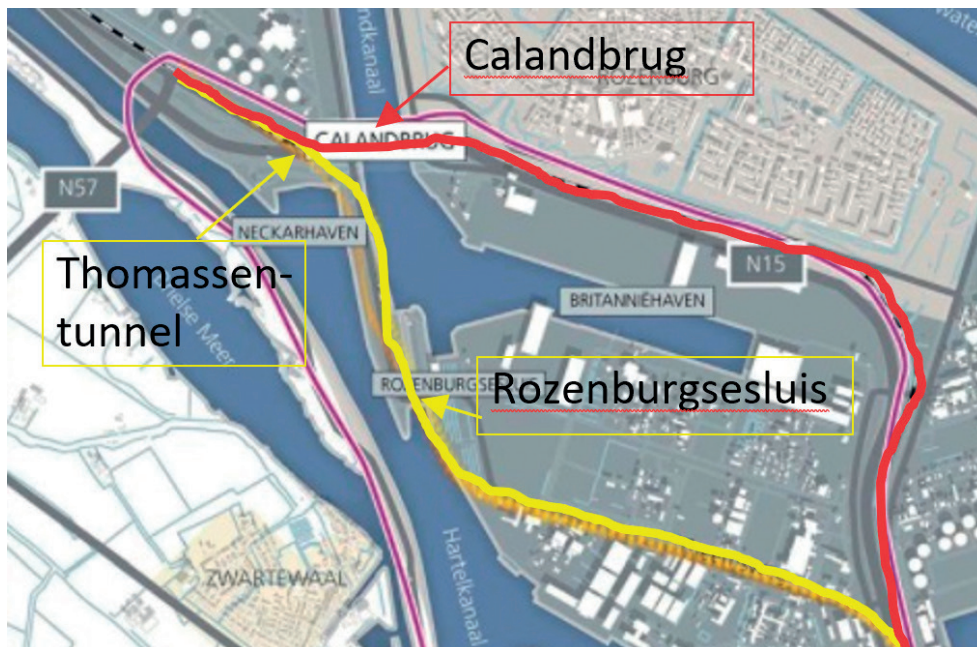
Zowel het treinverkeer als de scheepvaart van en naar de Maasvlakte en Europoort nemen toe. De nieuwe route van de Havenspoorlijn omzeilt de drukke Britanniëhaven en de Calandbrug, gaat over de Rozenburgsesluis en wordt verbonden met de bestaande spoorlijn via een brug over de Thomassentunnel in de snelweg A15. Het nieuwe stuk spoor van ruim vier kilometer vormt een oplossing voor het capaciteitsknelpunt bij de Calandbrug bij Rozenburg. Deze brug uit 1969 vormt een belangrijk verkeersknooppunt, maar is verouderd en biedt onvoldoende capaciteit voor het toenemende goederenvervoer. Bijkomend voordeel is dat het nieuwe spoor een stuk stiller zal zijn dan de stalen constructie van de Calandbrug.

Dubbelsporige boogbruggen

De brug over de Thomassentunnel is een dubbelsporige stalen verstijfde staafboogbrug met een hoofdo overspanning van 156,1 m en aanbruggen van respectievelijk 56,6 en 52,4 m. De totale lengte van de brug is 269,1 m. De hart-op-hart afstand tussen de hoofdliggers is 12,1 m. Om de bocht in het spoor op te vangen waaiert deze afstand uit tot 13,3 m op de zuidoostelijke aanbrug. De brug over de Rozenburgsesluis is een dubbelsporige stalen verstijfde staafboogbrug met een overspanning van 172,8 m. De totale lengte van de brug is 176,8 m. De hart-op-hart afstand tussen de hoofdliggers is 18,1 m, zodat de brug het gebogen spoor omsluit.

Figuur 1: Kaart van het projectgebied
(www.portofrotterdam.com)

- oude route
- nieuwe route



Figuur 2: Architectonische visie, brug over de Thomassentunnel



Figuur 3: Architectonische visie, brug over de Rozenburgsesluis

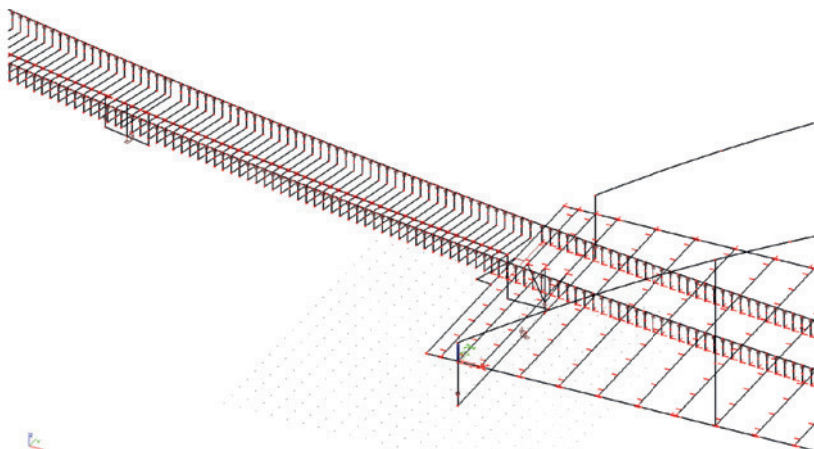
Architectonisch ontwerp

De brug over de Thomassentunnel is specifiek ontworpen als een stalen verstijfde staafboogbrug met stalen boog. Dit betekent een relatief zware hoofdbalk en een slanke boog. Dit type constructie is architectonisch meer geschikt voor het omringende landschap: het benadrukt de lengte van de brug en past daarom beter in de schaal

van het industriële landschap waarin het is geplaatst. De grote hoofdlijger biedt de buigstijfheid voor ongelijkmatige belasting van de hoofdoverspanning en is ook sterk genoeg voor de zijspanningen. In dwarsdoorsnede zijn de hoge hoofdlijgers zeer effectief om geluidsemisatie naar de omgeving te verminderen. Voor de brug over de Rozenburgsesluis vereiste de meer parkachtige omgeving van de sluis een zachtere vorm. Bij het detailleren van de booggeboorte is de ronde vorm van de boog zelf meer uitgesproken. Constructief wordt hetzelfde systeem gebruikt als de brug over de Thomassentunnel.

Boogstabiliteit

Om te controleren of de boog onder alle omstandigheden stabiel blijft, is de knikstabiliteit geanalyseerd. Omdat de controle op kniklengte via de standaardberekenningsregels redelijk conservatief is, is een eindige-elementenmodel gebruikt om de eigenwaarde te berekenen. Voor beide bruggen is de zijwaartse stabiliteit van de boog bepalend. Dit komt door het feit dat er om architectonische redenen geen windverbanden tussen de twee bogen aanwezig zijn. Op deze manier lijkt het

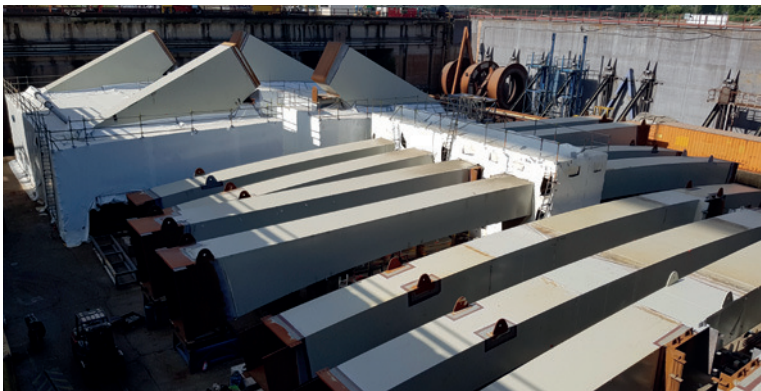


Figuur 2: Detail van het model (Rozenburgsesluis) voor gecombineerde respons



(Foto's: André Klarenbeek)

Afbranden lasuitloper dwarsdrager tegen een onderflens hoofdligger met een mal



Overzicht droogdok in Hoboken met booggeboortes



Booggeboorte - rechtop met binnenlijfplaat vooraan

zijwaartse gedrag op een Vierendeel-lijger. De eigenwaarden zijn gebruikt om de kritische knikkracht en vervolgens de kniklengte te bepalen, waarna er een volledige stabiliteitstoetsing conform de Eurocode uitgevoerd werd. Het resultaat van deze toetsing is dat de stabiliteit is gegarandeerd.

Betonnen dek

Het dek van de boogbruggen is van beton. Om gewicht te besparen is dit betonnen dek zeer slank met de dikte van slechts 400 mm. Het betonnen dek is schuifvast

verbonden met de stalen dwarsliggers. Nadeel is dat in de hoofdovertopping het betonnen dek op trek wordt belast, omdat het een verstijfde staaftoegedrag betreft.

Controle van de scheurwijdte

Ondanks de grote hoeveelheid wapening voldoet de berekende scheurwijdte niet aan de strenge eisen volgens de Eurocode. Dit komt vooral door de krimp van het beton. Met de geldende normen kan dit onmogelijk worden vermeden. Een andere belangrijke factor is het feit dat het dek in de spanningszone van een verbonden boogbrug is geplaatst. De later aangebrachte permanente en variabele belasting zullen extra trekkrachten in het betonnen dek veroorzaken. Om zonder problemen door de scheurwijdte nog steeds zo'n slank dek te kunnen ontwerpen, zijn uitvoeringsmaatregelen genomen zoals een coating, eisen aan de stort-, en uithardingstemperatuur en toevoeging van vezels.

Verbinding tussen beton en staal

Om volledige verbinding te garanderen, moet het beton worden verbonden met de stalen dwarsliggers. Deze verbinding wordt gerealiseerd met behulp van deuvels op de bovenflens van de dwarsliggers en het lijf van de hoofdligger. De deuvels worden op sterkte, vermoeiing en bruikbaarheid getoetst volgens de Eurocode. Dit resulteerde in een grote hoeveelheid deuvels in de zones waar de krachten worden overgedragen tussen de booggeboorte en het uiteinde van de brug.

Stijfheid van beton

De werkelijke stijfheid van het beton hangt niet alleen af van het materiaal, maar verschilt ook tussen het gescheurde en niet-gescheurde stadium. Daarom zijn de krachten in het beton berekend met behulp van de ongescheurde stijfheid, terwijl de krachten in de stalen hoofdliggers en boog zijn bepaald met behulp van de gescheurde stijfheid.

Gecombineerd gedrag

Over een lengte van vier kilometer wordt het spoor op een reeks betonnen bruggen geplaatst, voordat het de eerste stalen brug bereikt. Het gecombineerde gedrag van brugconstructie en spoor op variabele belastingen is daarom erg belangrijk. Omdat het spoor over kunstwerken met verschillende stijfheden gaat en omdat het spoor in een bocht op de kunstwerken ligt, is een eenvoudige 'hand'som niet mogelijk. Er is een lengte van ongeveer 500 m spoor en aangrenzende brugconstructies toegevoegd aan het FEM-model van de brug, waar het gedetailleerde model van de brug wordt gebruikt en de

aangrenzende betonnen overspanningen worden gemodelleerd met balkelementen.

Uit deze analyse bleek dat bij de brug over de Thomassen-tunnel de spanningen in de spoorstaaf de limiet overschreden bij de overgang van stalen brug naar betonnen brug. In overleg met ProRail heeft de oplossing met het toevoegen van extra spoorstaaf de voorkeur. De extra rail wordt over een lengte van 90 m (45 m aan beide zijden van de brugovergang) aangebracht om de spanningen op een acceptabel niveau te krijgen.

Dynamisch gedrag.

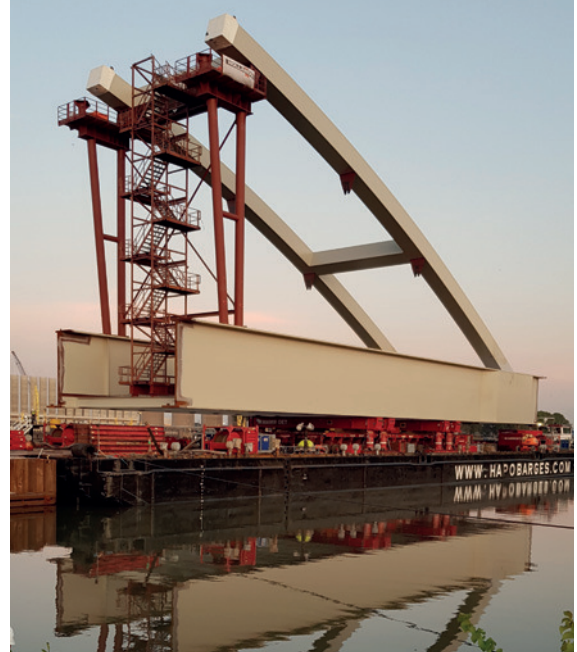
Voor horizontaal dynamisch gedrag van een spoorbrug zijn enkele basisregels gegeven in de Eurocode. Volgens NEN-EN 1990 art. A.2.4.4.2.4 (3) mag de horizontale frequentie van een spoorbrug niet lager zijn dan 1,2 Hz. In de praktijk is het voor langere bruggen onmogelijk om aan deze eis te voldoen. Er worden geen verdere controles of richtlijnen gegeven voor bruggen die niet voldoen. Voor dit project zijn specifieke eisen gesteld indien de brug niet aan dit artikel voldoet. Deze omvatten een dynamische berekening van het horizontale gedrag van de brug, met behulp van drie verschillende scenario's. Voor beide bruggen zijn de aanvullende dynamische berekeningen gebruikt om aan te tonen dat de brug voldoet aan de vereisten voor dynamisch gedrag.

Hanger trilling

De hangers van de brug kunnen trillen in de wind als gevolg van vortex wervels (von Karman vortex street). In de Eurocode worden enkele formules voor dit fenomeen gegeven. Echter, op basis van eerdere ervaringen blijkt dat de correlatielengte en de dempingswaarden die in de Eurocode staan te gunstig zijn. Voor deze twee bruggen vertoonden de berekeningen excitaties die aanleiding gaven tot spanningen boven de grenswaarde van de gebruikte details. Omdat het aantal wisselingen snel erg groot kan worden, is dit een ongewenste situatie. Daarom zijn er spiralen aan de buitenkant van de hangers toegevoegd, om te voorkomen dat de gesynchroniseerde belasting vortex wervels veroorzaakt.

Vermoeiing

Vanwege de grootte van de brug is het eigengewicht hoog en zijn de spanningsamplitudes als gevolg van een passerende trein relatief klein. Door het stalen betonnen dek en spoor in ballast zijn er geen kritische stalen details aanwezig. Door nog steeds te kiezen voor verstandige detaillering in de staal-op-staal verbindingen, wordt een grote weerstand tegen vermoeidheid gerealiseerd.



Lossen brugdeel sectie bij bouwlocatie



Zicht bovenin booggeboorte

Beide bruggen krijgen in het voorjaar van 2020 hun definitieve plaats. De bouw van het Theemswegtracé verloopt geheel volgens schema. Naar verwachting rijdt eind 2021 de eerste trein erover. ●

Arjen Steenbrink, Mark van der Burg, Bert Hesselink, Movares

Bronnen:

1. Havenbedrijf Rotterdam. Theemswegtracé Haven van Rotterdam - Architectonische visie op 4 kilometer nieuw spoor. Rotterdam; 2017. (Gebruikt voor de artist impressions van de nieuwe bruggen)
2. Steenbrink, A. Burg M. van der, The design of two Large Span Arch Bridges in the Port of Rotterdam. 40th IABSE symposium, Nantes, 2018