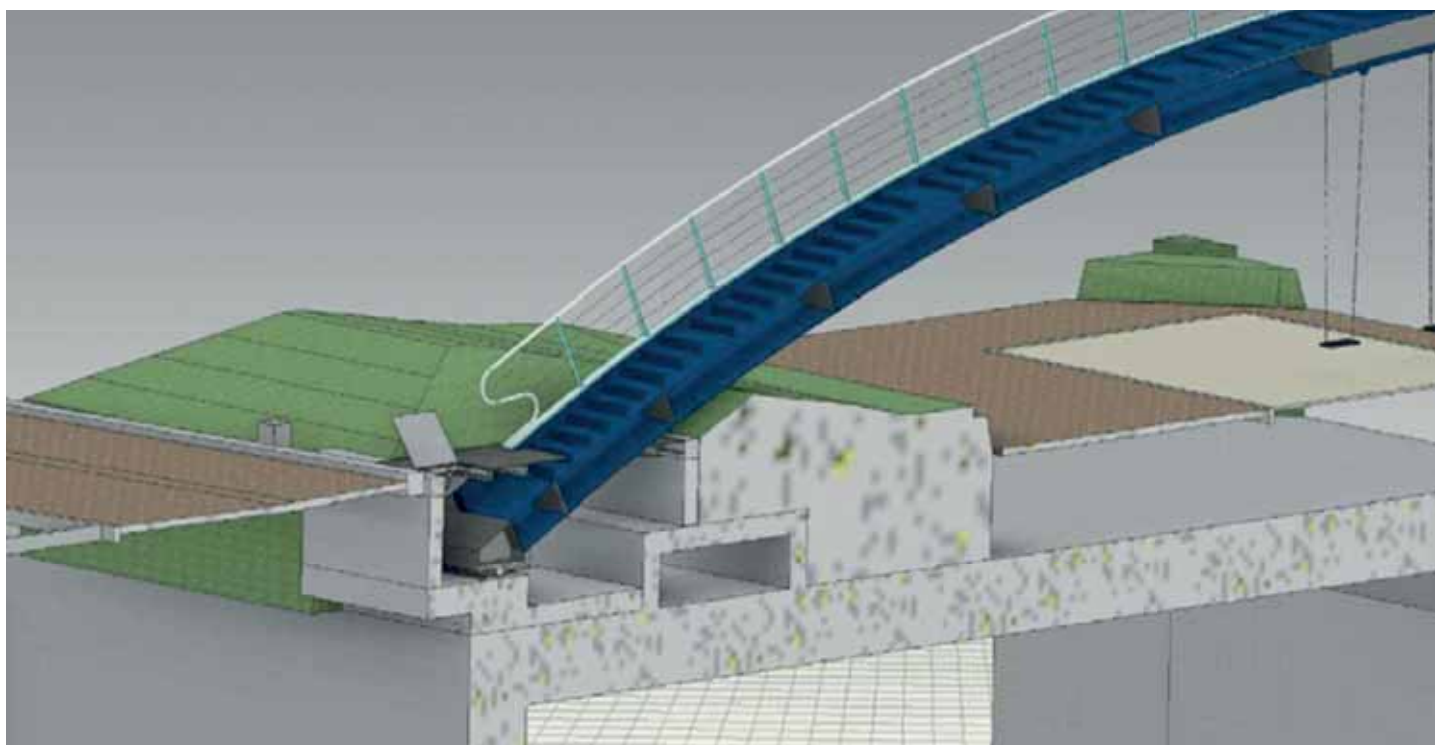


WRINGSTIJVE KOKER BOVEN TUNNELBUIJS

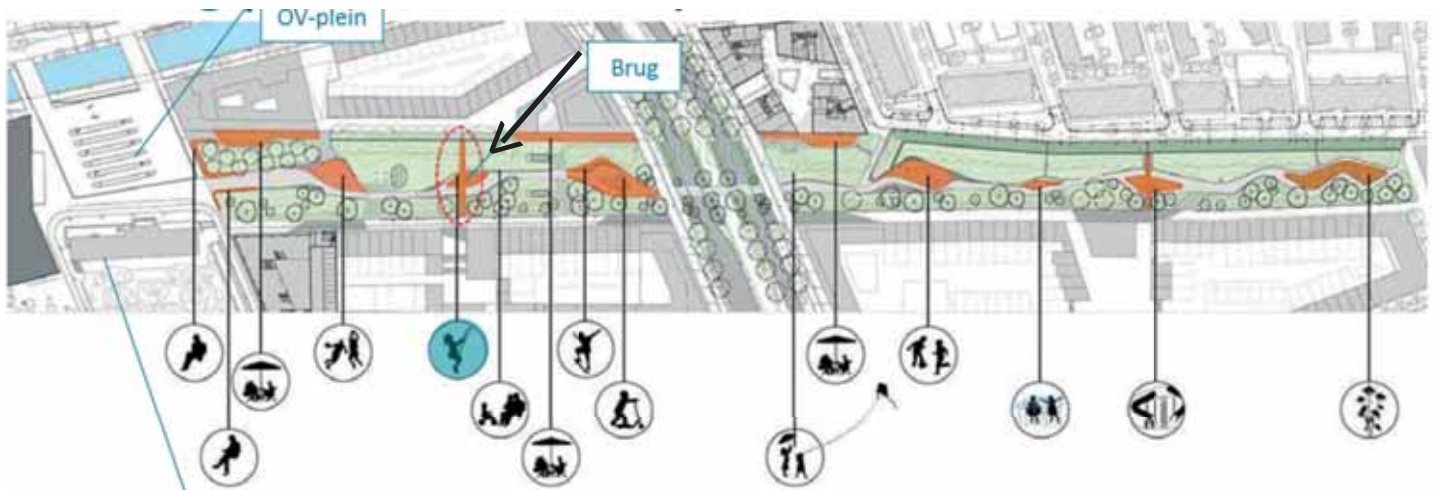
ir. J. Voermans RC en ir. P.A. Hagenaaars RO¹

In een park wordt een voetgangersbrug met schommels ontworpen. Het ontwerp gaat uit van een doorgaande, luchtdicht afgelaste koker. Indien deze niet in zijn geheel aangevoerd kan worden, moet de brug in secties op locatie worden samengesteld. Het architectonisch ontwerp had constructief gezien een reeks opgaven in petto, voordat het werd aanbesteed: het slanke ontwerp in relatie tot comforteisen, de afdracht van de brug op de spoortunnel (krachtsoverdracht staal naar beton) en de schommels onder de brug, die ook krachten uitoefenen. Dit artikel gaat in op enkele rekenkundige aspecten.

¹ Jurgen Voermans is constructeur en adviseur kunstwerken Regionale Ontwikkeling & Infrastructuur Zuid-West Nederland en Peter Hagenaaars is expert constructies, beiden bij Royal HaskoningDHV



1 Geboorte van de boogconstructie



2 Plan Nieuwe Delft

Het spoorviaduct dat voorheen Delft doormidden sneed, is met de komst van de nieuwe spoortunnel verleden tijd. Boven maaiveld van de spoorzone vindt de herontwikkeling plaats tot een nieuwe leef- en woonomgeving, genaamd Nieuw Delft. Dit gebied (zie fig. 2) is gelegen tegen het historische hart van Delft aan en beslaat circa 24 hectare.

Boven op het dak van de spoortunnel komt het Van Leeuwenhoekpark naar het ontwerp van BALJON landschapsarchitecten. Dit park, dat begint ter hoogte van de voormalige Van Leeuwenhoeksingel, loopt boven de tunnelbuis van noord naar zuid. Met zijn afmetingen van circa 600 m lang en 40 m breed, en onderbroken door een verkeersroute met groen asfalt, vormt deze groene zone een nieuwe, lange lijn, analoog

aan de binnenstad met zijn korte dwarsverbindingen in de vorm van bruggen. Het moet een recreatieve ontmoetingsplek worden voor inwoners en bezoekers. Het park wordt gefaseerd aangelegd van noord naar zuid. Het Definitief Ontwerp van het noordelijk deel van het park is gereed. Onderdeel hiervan is een stalen voetgangersbrug die gefundeerd is op de spoortunnel. In opdracht van de Gemeente Delft en Projectorganisatie Nieuw Delft heeft Royal HaskoningDHV het architectonisch ontwerp van de brug van de architect vertaald naar een maakbaar constructief ontwerp.

ARCHITECTONISCH ONTWERP

Het architectonisch ontwerp (zie fig. 3) van de brug gaat uit van een smalle, ranke

voetgangersbrug die uitzicht biedt op het park en Nieuw Delft. De geometrie van de boog (bk. dek) wordt beschreven met een radius van 38,075 m. De overspanning gemeten tussen het hart van beide booggeboorten bedraagt 37,6 m. De breedte van het loopvlak betreft 1,20 m. De vrije hoogte onder de brug in het midden is 4,15 m. De brug draagt af op de tunnel waarbij de brug vloeiend opgenomen wordt in het talud (zie fig.1). De traptreden liggen verzonken in het dek en zijn niet zichtbaar vanaf het park. Opvallend aan het ontwerp is dat er schommels onder de brug komen te hangen. Het leuningwerk gaat uit van een ronde bovenregel dat steunt op slanke staanders. Door de staanders worden roestvaststalen draden gevoerd, voorgespannen met roestvaststalen wartels.



3 Architectonische ontwerp

Opvallend aan het ontwerp is dat er schommels onder de brug komen te hangen

VAN ARCHITECTONISCH NAAR CONSTRUCTIEF ONTWERP

Het architectonisch ontwerp van de brug bracht constructief gezien de volgende vraagstukken met zich mee: het slanke ontwerp (met name in relatie tot comfort-eisen), de afdracht van de brug op de bestaande spoortunnel en de schommels in relatie tot de (mogelijke) dynamische respons.

SLANKE KOKER

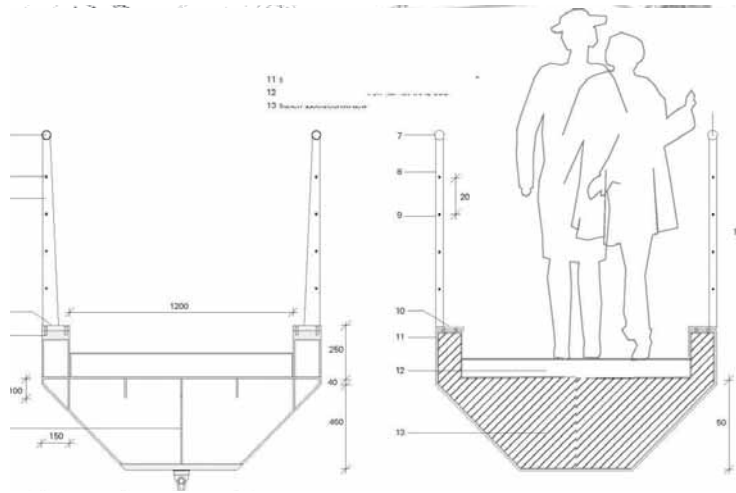
Het constructief ontwerp gaat uit van een wringstijve koker die de hoofdconstructie van de brug vormt. Het ontwerp wordt gedomineerd door de eisen aangaande het comfort (bruikbaarheidsgrenstoestand). De brug moet zodanig stijf worden ontworpen dat de versnellingen als gevolg van voetgangers en joggers die over de brug lopen en rennen binnen de grenzen blijven. Als gevolg hiervan zijn de spanningen in de uiterste grenstoestand relatief klein. Om de volledige constructiehoogte van 750 mm te benutten, is gekozen om de flenzen van beide lijven samen als bovenflens van de kokervormige doorsnede te laten fungeren. Het zwaartepunt ligt dan ongeveer in het midden van de hoogte zodat de doorsnede zo efficiënt mogelijk wordt benut binnen de grenzen van het architectonisch ontwerp.

Het belopen dek (zie fig. 4) bestaat uit een dekplaat ($t = 10$ mm), verstijfd in langsrichting met dekverstijvers ($t = 8$ mm; $h = 100$ mm) met een hart-op-hartafstand van 300 mm. De dekverstijvers dragen af op schotten ($t = 8$ mm) h.o.h. 3 m (bovenzijde dek).

Dit dek draagt de trap die bestaat uit een gezette, 5 mm dikke staalplaat. De leuning, een buisvormige bovenregel CHS 48,3x 2,6 mm, draagt af op standers (plat 85x18 mm verlopend naar 40x18 mm) met een hart-op-hartafstand van 1,27 m op een doorlopende voetplaat ($t = 25$ mm) die wordt verbonden met vier bouten M12 per stander.

De afwatering gebeurt door de traptreden een lichte helling naar beneden te geven. Er is in geen verlichting op/onder de brug voorzien.

Het ontwerp gaat uit van een doorgaande luchtdicht afgelaste koker die, indien deze niet in zijn geheel aangevoerd zou kunnen worden, in twee of drie delen aangevoerd wordt en met lassen op de bouwplaats of een voorbouwlocatie samengesteld wordt.



4 Doosnede hoofdconstructie

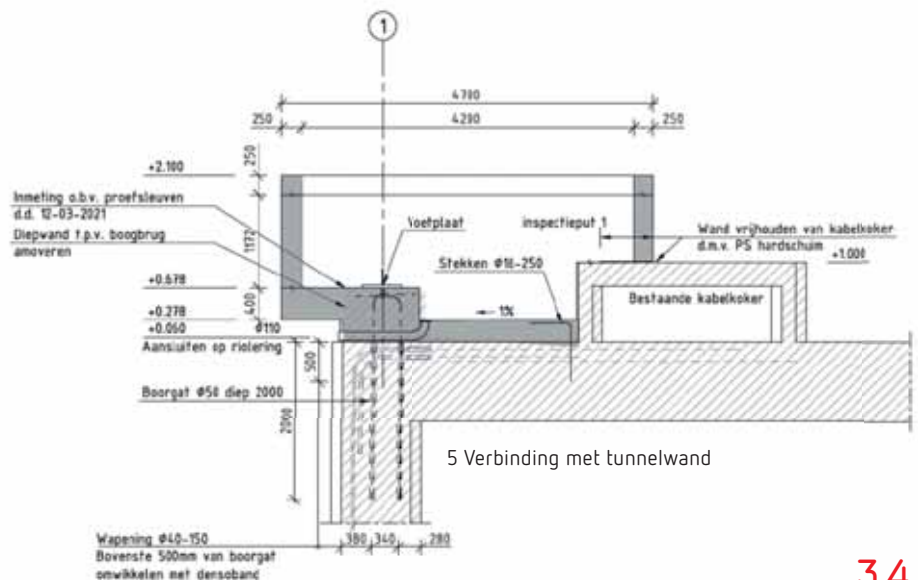
OVERWEGING DRIESCHARNIERSPANT

Aanvankelijk is overwogen om de brug met een topscharnier als driescharnierboog uit te voeren. Dit zou als voordeel hebben dat thermische belastingen geen krachtswerking tot gevolg hebben en dat, indien de brug niet in één geheel aangevoerd zou kunnen worden, beide helften met een mechanische verbinding verbonden zouden kunnen worden. Nadeel was dat niet aan het beeld van de architect voldaan zou kunnen worden, die een doorgaande koker voor ogen had. Om deze reden is hiervan afgezien.

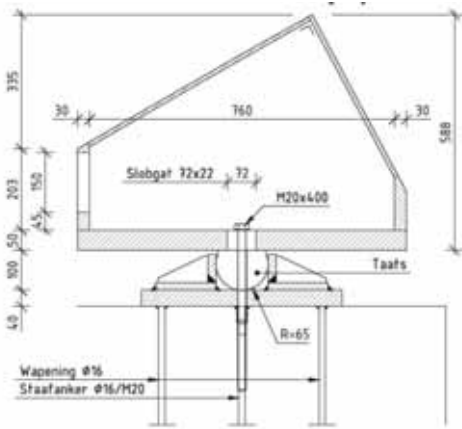
VERBINDING MET TUNNEL

De verbinding met de tunnel (zie fig. 5) bevindt zich onder maaiveld. In verband met onderhoud en inspectie zijn putten voorzien. Nabij beide geboorten, wordt de brug breder tot maximaal 2,50 m (zie fig. 7) om de belastingen te spreiden en over te dragen op de tunnelwand en om de brug in te kunnen klemmen om de langsas van de brug (afb. 5). De verbinding bestaat in hoofdzaak uit een doorgaande lijntaatsoplegging op een betonnen sloof. De krachtoverdracht van staal naar beton (zie fig. 6) vindt plaats via

het bolle cilindervlak van de lijntaatsoplegging, die geborgd is middels staafankers in slobgaten, naar de platte vlakken van de stoelen gelast op een voetplaat die verbonden is met de sloof, middels aangelaste wapening en afschuifnokken. Vervolgens worden de krachten van de betonnen sloof afgedragen op de tunnel via ingeboorde stekken in de diepwand en een vloer. De stekken worden ingeboord bij de zones waar zich geen wapening in de diepwand bevindt. Bij de voeg tussen twee diepwandpanelen wordt geen wapening ingeboord in verband met het voegprofiel dat zich daar bevindt. De westelijke sloof is circa 7,3 m lang (vier bevestigingspunten) en de oostelijke sloof is $\sim 3,5$ m lang (drie bevestigingspunten). De vloer draagt de (afschuif)belastingen af naar het tunneldak. De verbinding wordt gerealiseerd met in te lijmen stekken, verankerd aan beide zijden van het aansluitvlak. Met dit detail wordt bewerkstelligd dat de krachten voldoende gespreid worden zodat deze op de tunnel kunnen worden afgedragen waarbij de constructieve veiligheid van de tunnel gewaarborgd blijft.



5 Verbinding met tunnelwand



6 Lijntaatsoplegging

SCHOMMELS

In tegenstelling tot de drie schommels bevat het uiteindelijke ontwerp twee schommels iets uit het midden van de brug. Tijdens het schommelen worden krachten op de brug uitgeoefend. Deze bestaan uit centrifugale kracht en de zwaartekracht. Door de brug te verbreden nabij beide geboorten, ontstaat een stijve rotatieveer en zal de brug pas willen trillen (uit het vlak van de boog) bij frequenties $\geq 4,20$ Hz. Aangezien dit hoger is dan de belasting uit de schommels, die wordt opgelegd met een frequentie van zo'n 0,21 Hz, is excitatie door de schommels niet aan de orde

In relatie tot trillingen die zijn beschouwd zijn opgenomen in tabel 1. De comfortcriteria voor voetgangers en joggers zijn bepaald volgens NEN-EN 1990, NEN-EN 1991-2 en EUR 23984 en *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations* (JRC-ECCS).

De dynamische respons is bepaald aan de hand van een modale analyse. In tabel 2 zijn de eerste vijf eigenfrequenties met bijbehorende trilvorm opgenomen voor de massacombinatie CM1_TC3 ('zwaar verkeer') en CM3_JC2 ('joggers').

Hieruit blijkt dat alleen de 1^e eigenfrequentie van de brug, waarvan de trilvorm gekarakteriseerd kan worden als trilling in het vlak van de boog, binnen het kritische gebied valt van voetgangersbruggen onder loopbelasting voor verticale en horizontale trillingen ($1,25 < f < 4,6$ Hz).

De optredende versnellingen zijn getoetst aan de grenswaarden zoals gegeven in tabel 1. De brug is niet gevoelig voor excitatie (het in trilling brengen) door voetgangers in zijdelingse richting ($0,5 < f_i < 1,2$ Hz) en ook niet voor excitatie door joggers ($1,9 < f_i < 3,5$ Hz).

De optredende spanningen door vandalismebelasting zijn getoetst aan het vloeicriterium van Von Mises (maximale spanning bedraagt 12 N/mm² voor de globale krachswerking).

BEREKENINGEN HOOFDDRAAGCONSTRUCTIE

De berekeningen van de hoofddraagconstructie zijn verricht met een eenvoudig rekenmodel bestaande uit 1D-elementen in een programma op basis van de eindige elementenmethode.

Alle onderdelen van de doorsnede kunnen in klasse 3 geclassificeerd worden zodat de weerstand niet beperkt is door de plooiweerstand. Gezien de compacte vorm van de koker en het ontbreken van tussensteunpunten, zijn effecten van 'shear lag' verwaarloosbaar zodat de volledige breedte van de flenzen wordt benut.

STATISCHE RESPONS

De statische respons is bepaald aan de hand van een lineair-elastische analyse. De optredende spanningen zijn getoetst aan het vloeicriterium van Von Mises (maximale spanning bedraagt 104 N/mm² voor de globale krachswerking). De maximale doorbuiging door voetgangersbelasting die optreedt bij een asymmetrische belasting (brug half belast), is getoetst aan een grenswaarde van L/250 waarbij voor L de halve overspanning is genomen, van geboorte tot buigpunt in de top van de boog gemeten over de geprojecteerde lengte van de boog. Aan de hand van een lineair-elastische (knik of eigenwaarde) bifurcatie-analyse is bepaald dat het tweede-orde effect kan worden verwaarloosd omdat $a = \text{crit } 43 > 10$ zodat volstaan kan worden met een eerste-ordeberekening¹. De knikvorm, die hoort bij de 1^e eigenwaarde, geeft aan dat de knik in het vlak van de boog plaats vindt.

DYNAMISCHE RESPONS

in relatie tot trillingen die zijn beschouwd zijn deze opgenomen in tabel 1. De comfortcriteria voor voetgangers en joggers zijn bepaald volgens NEN-EN 1990, NEN-EN 1991-2 en EUR 23984 en *Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations* (JRC-ECCS).

De dynamische respons is bepaald aan de hand van een modale analyse. In tabel 2 zijn de eerste vijf eigenfrequenties met bijbehorende trilvorm opgenomen voor de massacombinatie CM1_TC3 ('zwaar verkeer') en CM3_JC2 ('joggers').

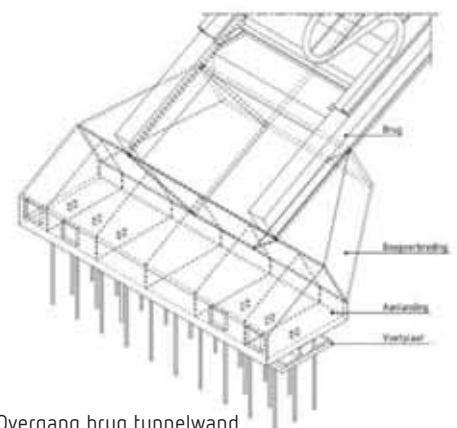
Hieruit blijkt dat alleen de 1^e eigenfrequentie van de brug, waarvan de trilvorm gekarakteriseerd kan worden als trilling in het vlak van de boog, binnen het kritische gebied valt van voetgangersbruggen, onder loopbelasting voor verticale en horizontale trillingen ($1,25 < f < 4,6$ Hz).

De optredende versnellingen zijn getoetst aan de grenswaarden zoals gegeven in tabel 1. De brug is niet gevoelig voor excitatie door voetgangers in zijdelingse richting ($0,5 < f_i < 1,2$ Hz) en ook niet voor excitatie door joggers ($1,9 < f_i < 3,5$ Hz).

De optredende spanningen door vandalismebelasting zijn getoetst aan het vloeicriterium van Von Mises (maximale spanning bedraagt 12 N/mm² voor de globale krachswerking).

CONCLUSIE

Ondanks de diverse constructieve uit is het architectonisch ontwerp succesvol vertaald naar een haalbare en maakbare constructie waarbij de constructieve veiligheid van de spoortunnel gewaarborgd is. Het project is inmiddels aanbesteed op basis van een RAW-bestek en gegund aan aannemersbedrijf Wallaard in combinatie met Damsteegt die de detailengineering verzorgt. De planning is dat de brug eind 2023 geplaatst zou zijn.



7 Overgang brug tunnelwand

¹ a_{crit} is de factor waarmee de rekenwaarden van de belastingen op de constructie moeten worden verhoogd om algemene elastische instabiliteit te veroorzaken (a_{crit} bedraagt 104 N/mm² voor de globale krachswerking). De maximale doorbuiging door voetgangersbelasting die optreedt bij een asymmetrische belasting (brug half belast), is getoetst aan een grenswaarde van L/250 waarbij voor L de halve overspanning is genomen, van geboorte tot buigpunt in de top van de boog gemeten over de geprojecteerde lengte van de boog. Aan de hand van een lineair-elastische (knik of eigenwaarde) bifurcatie-analyse is bepaald dat het tweede-orde effect kan worden verwaarloosd omdat $a = \text{crit } 43 > 10$ zodat volstaan kan worden met een eerste-ordeberekening.