



Catharinabrug in Leiden (1): ontwerp

ir. Rogier van Nalta, ir. Mirte de Graaff
Pieters Bouwtechniek Delft BV
MArch Jimmy van der Aa
DP6 architectuurstudio BV

Extreme engineering met UHSB



1

1 De Catharinabrug, een vernieuwende brug die ingetogen opgaat in de historische omgeving

foto: Gerda van Ekris i.o.v. Hi-Con NL

2 Planvisie met nieuw winkelrondje



2

Op een prominente plek in hartje Leiden is een zeer slanke brug van ultra-hogesterktebeton (UHSB) gerealiseerd. Met een lengte van 36 m en een slankheid van 1:81 is het de slankste en langste UHSB-brug van Nederland. De brug is van boven gezien S-vormig en het dek is dubbelgekromd om goed aan te sluiten op de kades. Ondersteuning en dek zijn geprefabriceerd en ter plaatse met een speciaal type UHSB aan elkaar gestort. Dit artikel gaat in op het ontwerp van de brug. In twee volgende artikelen worden de fabricage en uitvoering toegelicht.

Nieuw winkelrondje

De binnenstad van Leiden heeft twee belangrijke winkelstraten: de Haarlemmerstraat en de Breestraat, met het Aalmarktgebied als verbindend element. Een betere verbinding tussen beide straten werd gezien als een kans het winkelgebied te versterken.

Bovendien was er behoefte aan meer grote A1-winkelunits. In een stedenbouwkundig plan zijn de straten met elkaar verbonden door een nieuwe winkelstraat: de Catharinasteeg. Hierdoor ontstaat een nieuw winkelrondje (fig. 2). De panden langs deze steeg zijn door de gemeente aangekocht en worden herontwikkeld tot grote winkelunits. Om het winkelrondje mogelijk te maken, was een nieuwe brug voor voetgangers en fietsers nodig tussen de nieuwe Catharinasteeg en de Stille Mare. Dit is een historische locatie in hartje centrum, namelijk het punt waar de Oude en Nieuwe Rijn samenkomen en van waaruit Leiden is ontstaan. Een zorgvuldige inpassing in de historische context was dan ook een belangrijk onderdeel van de opdracht.

Voor het ontwerp van de brug is in 2012 een meervoudige onderhandse aanbesteding op basis van EMVI-criteria uitgeschreven voor de selectie van een architect, met de constructeur als onderaannemer van de architect. De belangrijkste beoordelingscriteria vanuit de gemeente waren:

- ervaring met vergelijkbare projecten;
- visie op het integreren van een functioneel ontwerp in de historische omgeving;



3

- visie op het evenwicht tussen begaanbaarheid en doorvaarbaarheid;
- visie op het verkrijgen van draagvlak bij bevoegde instanties en belanghebbenden;
- visie op binnen budget ontwerpen;
- visie op duurzaam ontwerpen;
- kwaliteitsbeheersing en borging;
- hoogte van de offerte.

Verder gaf het programma van eisen (PvE) aan dat de brug een breedte moest hebben van 6 m, een hellingspercentage van maximaal 1:12 (maar liever 1:25) en een doorvaarthoogte van 1,5 m (maar liever 1,75 m).

Ontwerp

DP6 architectuurstudio kwam met het idee van een brug van ultra-hogesterktebeton en benaderde Pieters Bouwtechniek vanwege hun ervaring met het materiaal [1, 2, 3, 4 en 5]. De architect stelde een zeer slank brugdek voor om te kunnen voldoen aan het hellingspercentage en de doorvaarthoogte. Door het dek niet op te leggen op de kades en ook door de gekozen kleur van dek en ondersteuning, is de brug visueel los gehouden van de omgeving. De horizontale lijn is benadrukt met de slanke rand van het dek en het hekwerk, dat alleen met vele heel dunne spijlen zonder zichtbare verbinding op het dek is vastgezet (foto 1). De leuning benadrukt door haar detaillering en kleurgebruik de horizontaliteit van de brug. De ledsfeerverlichting versterkt dit in de avond nog eens extra. Het dek is in verschillende afwerkingen grijs tinten uitgevoerd. Hierdoor ontstaan rustpunten in de route van waaruit over

het water kan worden uitgekeken (foto 3).

De horizontale krommingen van het dek maken de brug iets langer waarmee de doorvaarteisen en hellingspercentages waren te halen. Hierbij is gekeken naar de repetitie en transporteerbaarheid van de elementen (de brug is opgedeeld in acht elementen).

Doorslaggevend voor de gemeente om voor dit ontwerp te kiezen, waren de vernieuwende techniek die het mogelijk maakte aan het PvE te voldoen en het respect waarmee het ontwerp aansloot op de historische omgeving.

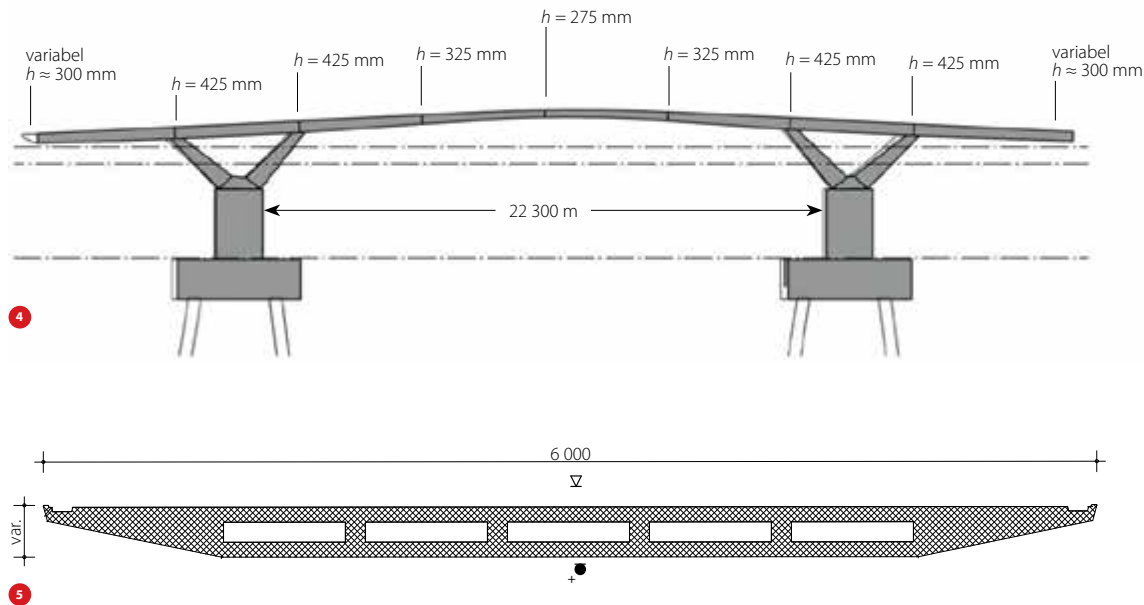
Zo slank mogelijk

Uitgangspunt voor het ontwerp was een zo slank mogelijk dek. De opdracht was dan ook om alles uit de kast te halen voor wat er met UHSB mogelijk was. Uitgangspunt hierbij was toepassing van het UHSB *Compact Reinforced Composite* (CRC) van Hi-Con met een cilinderdruksterkte die varieert tussen 120 en 170 N/mm².

De eerste stap bestond uit een zo optimaal mogelijk constructief systeem. Door de steunpunten naar binnen te plaatsen en te koppelen met een trekband, kon gebruik worden gemaakt van boogwerking. De trekband is gerealiseerd door de poeren onder water te koppelen met twee stalen buizen. De ideale boog kon niet worden bereikt (verre van). Door de steunpunten echter schuin te plaatsen, kon deze wel worden benaderd. Het gekozen systeem zorgde ervoor dat de krachten werden geconcentreerd boven de steunpunten. Hierdoor kon het dek in het midden van de overspanning worden verjongd. Door het dek van EPS te voorzien, is gewicht bespaard om het nog slanker te

- 3 Het dek is in verschillende grijs tinten uitgevoerd, waardoor rustpunten op de brug ontstaan
- 4 Langsdoorsnede brug
- 5 Dwarsdoorsnede brugdek

foto: Gerda van Ekris i.o.v. Hi-Con NL



maken. Dit resulteerde uiteindelijk in een ontwerp met een variabele dikte van 425 mm boven de steunpunten tot slechts 275 mm in het midden van de overspanning (fig. 4). Hiermee lukte het de gewenste doorvaarthoogte van 1,75 m te behalen over een breedte van 3,6 m en een doorvaartbreedte van wel 11,1 m te creëren met een hoogte van 1,5 m. Desondanks heeft de brug een helling van slechts 1:20.

Hoewel de brug een S-vorm heeft en het dek dubbelgekromd is, zijn de berekeningen in eerste instantie met een 2D-raamwerkpakket uitgevoerd (fig. 5). Voordeel hiervan was dat er gemakkelijk en snel met het ontwerp kon worden gevarieerd. De belangrijkste krachtwerving kon inzichtelijk worden gemaakt, de 3D-effecten werden handmatig bij de uitkomsten opgeteld. In een later stadium zijn 3D-EEM-berekeningen gemaakt. Hierbij is het raamwerkmodel gebruikt als controlemiddel.

Iteratieve berekening

Zowel het 2D-raamwerkpakket als het 3D-pakket kunnen niet met UHSB rekenen. Er is daarom een iteratieve methode toegepast. In beide programma's zijn het dek en de steunpunten in kleinere elementen opgedeeld. Vervolgens zijn op basis van de krachtsverdeling uit het programma de eigenschappen van de doorsnede bepaald. Hiervoor zijn specifiek voor het UHSB geschreven rekensheets gebruikt. Deze sheets zijn gebaseerd op de Eurocode en op rekenregels die met proeven zijn onderbouwd. Deze doorsnede-eigenschappen zijn vervolgens als custom-materiaal ingevoerd in de programma's. Hierna is de krachtsverdeling herberekend. Dit is net zo lang gedaan totdat krachten en doorsnede-eigenschappen met elkaar in evenwicht waren.

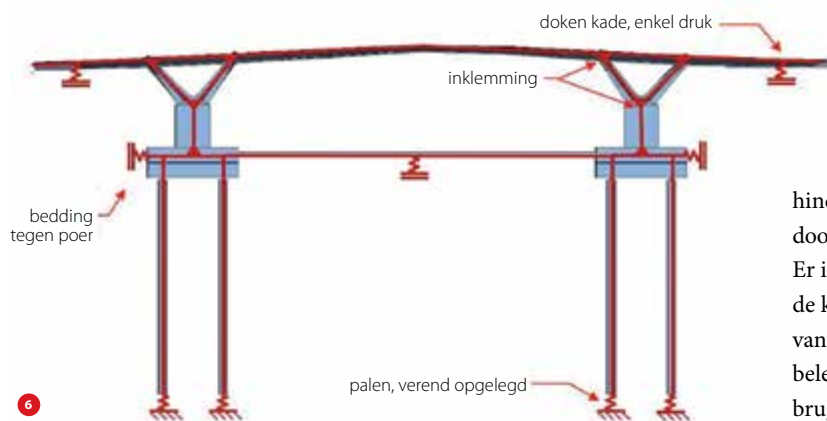
Stijfheid maatgevende factor

Bij het ontwerp van een zo slank mogelijk brugdek, loop je onvermijdelijk tegen de grenzen van doorbuiging en eigenfrequentie op. Het is dus van groot belang dat de stijfheid van de constructie goed kan worden ingeschat. Dit is bij beton vrij lastig, omdat de krachtsverdeling invloed heeft op de stijfheid en vice versa. Hoe hoger de belasting, des te meer het beton scheurt en dus hoe slapper de constructie reageert. Door de brug volledig met de hoogste (karakteristieke) belasting en volledige scheurontwikkeling door te rekenen, ontstaat echter een veel te conservatief ontwerp. De doorbuiging is daarom bepaald door de krachtsverdeling, de mate van scheurontwikkeling en doorbuiging per belastingscombinatie volgens de Eurocode te bepalen en te combineren.

De stijfheid van de doorsnede wordt door een aantal factoren beïnvloed:

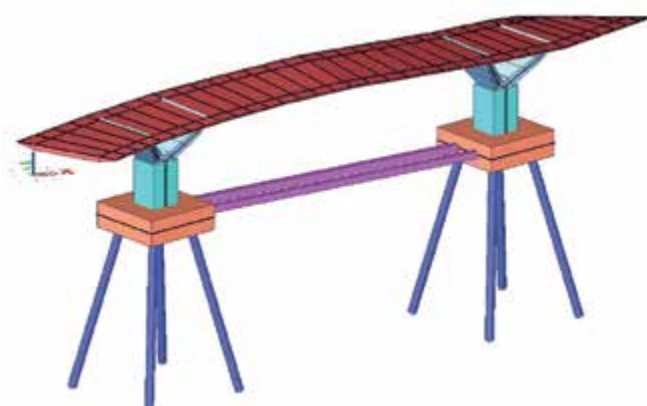
- trek- en drukwapening;
- statische E-modulus van beton op $t = 0$ en op $t \rightarrow \infty$;
- dynamische E-modulus van beton op $t = 0$ en op $t \rightarrow \infty$;
- belasting;
- snelheid van belasting;
- belastingsgeschiedenis (geheugen van beton);
- mate van scheurontwikkeling, die zelf ook weer afhankelijk is van bovenstaande factoren.

Vooral de mate van scheurontwikkeling is een belangrijke factor, want na een eerste scheur reageert een doorsnede aanzienlijk minder stijf. Het inschatten van de plaatsen waar en in welke mate doorsneden zijn gescheurd, is een van de lastigste aspecten van construeren met UHSB. Een traditionele benadering is het scheurmoment te berekenen met de treksterkte van



6 Mechanic schematizing van brug inclusief fundering

7 Rekenmodel met het brugdek en de wanden opgedeeld in mootjes met custom eigenschappen



hinderlijke trilling zouden veroorzaken. Dit kwam onder meer doordat die uiteinden aanvankelijk waren voorzien als uitkraging. Er is daarom voor gekozen het dek met horizontale doken aan de kade te bevestigen (foto 8). Die doken zijn pas na realisatie van de complete brug aangebracht. Hierdoor wordt enkel variabele belasting op de kade overgedragen. Constructief staat de brug geheel op zichzelf en is de verbinding met de kade niet noodzakelijk. Bij een test in het werk, vlak voor het aanbrengen van de doken, bleek alleen bij belasting van het uiterste puntje van de grootste uitkraging een lichte trilling voelbaar in de buurt van het kritische gebied. De inschatting dat de uiteinden kritisch waren, bleek dus correct. In de praktijk zou het comfort dus mogelijk ook met minder (of zelfs zonder) doken kunnen zijn verzekerd.

Voor het midden van het dek is een nauwkeuriger berekening gemaakt van de eigenfrequentie en het comfort. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen voetgangers en hardlopers. Voor het bepalen van de eigenfrequentie is de belastingscombinatie gebaseerd op het JRC-document 'Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations' (JRC is Europese Joint Research Centre). Volgens dit document is de kritische eigenfrequentie voor voetgangers $1,25 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 2,3 \text{ Hz}$ en lopen (groepen) hardlopers in een eigenfrequentie van circa 3 Hz. NEN-EN 1991-2 artikel 5.7 geeft aan dat beide groepen in het frequentiegebied tot 3 Hz lopen.

Voor de toetsing van het comfort van de brug zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- eigenfrequentie $f \leq 3 \text{ Hz}$ → toetsing o.b.v. de comfortcriteria van voetgangers;
- eigenfrequentie $3 \text{ Hz} \leq f \leq 5 \text{ Hz}$ → toetsing o.b.v. de comfortcriteria van hardlopers.

In het JRC-document wordt ook aangegeven dat een voetgangersbrug theoretisch in trilling kan worden gebracht door de tweede boventoon van de loopbelasting. Het kritische gebied zou dan moeten worden uitgebreid met $2,5 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 4,6 \text{ Hz}$ voor voetgangers. Tegelijk stelt de JRC echter dat er geen aanwijzingen zijn dat dit ooit is voorgekomen.

Comfortcriteria – voetgangers

Aangehouden zijn de comfortcriteria conform Eurocode 0 (NEN-EN 1990/NB:2011 art. A2.4.3.2). De maximaal toelaatbare versnelling van een willekeurig deel van het dek veroorzaakt door wind of voetgangers/verkeersbelasting bedraagt daarin:

1. $0,7 \text{ m/s}^2$ voor verticale trillingen door normaal gebruik en windbelasting;
2. $0,2 \text{ m/s}^2$ voor horizontale trillingen door normaal gebruik en windbelasting.

het beton uit de voorschriften. Hiermee wordt in de praktijk bij slanke constructies de plank echter flink mis geslagen. Daarom is samen met Hi-Con een andere aanpak ontwikkeld, die bij nameting in diverse projecten tot een betrouwbare benadering van de doorbuiging en eigenfrequentie leidt. De afgelopen jaren is die benadering steeds verder verfijnd. Hierdoor is de lat qua slankheid steeds hoger gelegd, met de Catharinabrug als huidig hoogtepunt. Op deze aanpak wordt verder niet ingegaan in dit artikel.

Direct na het verwijderen van de ondersteuning is de doorbuiging van het brugdek nagemeten. Het dek bleek in het midden van de overspanning circa 13 mm te zijn gezakt ten opzichte van de steunpunten. De voorspelling was maximaal 22 mm. De stijfheid van het dek bleek dus inderdaad veilig genoeg te zijn ingeschat.

Rekenen aan eigenfrequentie en comfort

Het comfort van de brug was het meest kritische aspect van het ontwerp, maar ook het lastigste te bepalen.

Uit de ontwerpberekeningen bleek de eigenfrequentie van zowel het midden als de beide uiteinden ruim onder de 5 Hz te liggen (bekende grenswaarde in de bruggenwereld). Voor het midden werd verwacht dat een nauwkeuriger benadering kon aantonen dat de brug zou voldoen. Voor de uiteinden werd het risico te groot geacht dat fietsers bij het op de brug rijden een



8

- 8 Het dek is met horizontale doken aan de kade bevestigd
- 9 De eerste trillingsvorm uit de EEM-berekening met SCIA

Deze versnellingen komen overeen met de middenwaarde van de medium comfortklasse CL2 in combinatie met verkeersklasse TC 3 volgens het JRC-document.

Tabel 1 Versnellingen volgens het JRC-document

comfortklasse	comfortgraad	verticale a_{limiit}	laterale a_{limiit}
CL2	middel	0,50 - 1,00 m/s ²	0,10 - 0,30 m/s ²
CL3	minimaal	1,00 - 2,50 m/s ²	0,30 - 0,80 m/s ²

Tabel 2 Toelichting op verkeersklasse TC 3, conform JRC-document

verkeersklasse	dichtheid d	beschrijving	kenmerken
TC 3	$d = 0,5$ persoon/m ²	zwaar verkeer	vrij lopen nog onbelemmerd; inhalen kan af en toe moeilijk zijn

Comfortcriteria – hardlopers

Er zijn in de Eurocode geen comfortcriteria opgegeven specifiek voor hardlopers. Uit onderzoek van de TU Delft en Gemeentewerken Rotterdam [6] blijkt dat de voetgangerscriteria voor deze groep te conservatief zijn. Hardlopers hebben veel minder last van trillingen, omdat de contacttijd van de voet kort is en de loopsnelheid hoog. Er mag dus een hogere versnelling worden toegelaten. Voor de comfortcriteria voor hardlopers is daarom uitgegaan van één comfortklasse lager dan die van voetgangers. Als maximaal toelaatbare versnelling is weer uitgegaan van de middenwaarde van de klasse (CL3).

1. 1,75 m/s² voor verticale trillingen door normaal gebruik en windbelasting;
2. 0,55 m/s² voor horizontale trillingen door normaal gebruik en windbelasting.

De horizontale trillingen zijn voor deze brug niet kritisch omdat de brug horizontaal goed is gestabiliseerd. Daarom

wordt hierna alleen op de verticale trillingen ingegaan. Daarbij is uitgegaan van de belasting volgens de door NEN-EN 1990 voorgeschreven verkeersklasse TC 3 (0,5 persoon/m²) uit het JRC-document.

Met een gemiddelde persoon van 74,4 kg (conform het JRC-document) geeft dit een verdeelde belasting van:

$$q_{\text{Qdyn}} = d \times G_{\text{persoon}} \times 10^2 = 0,5 \times 74,4 \times 10^2 = 0,372 \text{ kN/m}^2$$

In geval van een hardloper die de brug mogelijk in trilling brengt, is rekening gehouden met een hogere belasting. Dit in verband met de verhoogde snelheid van neerkomen:

$$F_{\text{persoon}} = 1250 \text{ N (conform de Eurocode)}$$

De eigenfrequentie is berekend met SCIA (fig. 9). Hierbij is de stijfheid bepaald op basis van de quasi-permanente belastingscombinatie en is gebruikgemaakt van de dynamische E-modulus (bepaald aan de hand van proeven). De verticale eigenfrequentie van het midden van het dek bleek 3,73 Hz. In de berekening is een gevoeligheidsanalyse gemaakt door de stijfheid van de ondersteuning te variëren.

Comfort voetgangers

De eigenfrequentie van 3,73 Hz ligt boven het kritische frequentiegebied $1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2,3 \text{ Hz}$ voor voetgangers. De brug voldoet daarmee aan de belangrijkste eis voor het verticale

9



trillingsgedrag. De eigenfrequentie ligt wel in het gebied van $2,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$, waarin theoretisch een trilling kan ontstaan door de tweede boventoon. Er is daarom gecontroleerd of het brugdek gevoelig is voor resonantie door de tweede boventoon, wat niet het geval bleek te zijn.

Comfort hardlopers

De eigenfrequentie van 3,73 Hz ligt in het kritische frequentiegebied $3,0 \text{ Hz} \leq f_i \leq 5,0 \text{ Hz}$ voor hardlopers. Daarom is getoetst of de versnelling van het brugdek voldoet aan de comfortcriteria voor hardlopers. De verticale versnelling is bepaald met de Responsie Spectrum Methode uit het JRC-document. Deze methode is ontwikkeld voor bruggen die zich als een buiglijger gedragen, wat bij de Catharinabrug het geval is. De brug is hiervoor omgerekend naar een equivalente ligger op twee steunpunten. De uitkomst was een maximale verticale versnelling van $a = 1,60 \text{ m/s}^2$. Dit is dus lager dan de genoemde eis $a \leq 1,75 \text{ m/s}^2$ voor verticale trillingen door normaal gebruik en windbelasting.

Hierbij moet worden gezegd dat de berekening met de Responsie Spectrum Methode een vereenvoudigde, conservatieve methode is om de maximale versnelling te bepalen. Een gedetailleerde modale analyse volgens de SDOF-methode (Single Degree Of Freedom) zou lagere versnellingen als uitkomst hebben maar was in dit geval niet noodzakelijk.

Verschillende springfrequenties

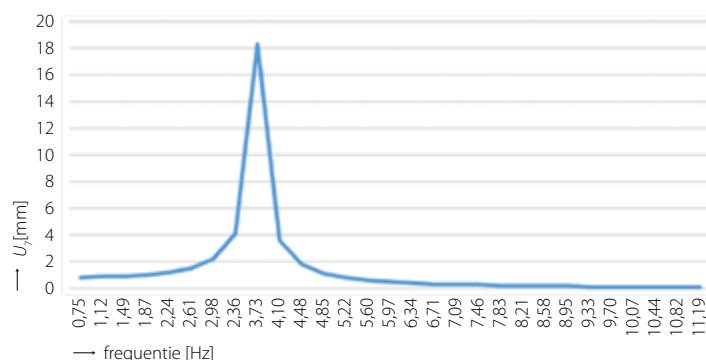
De maximale berekende optredende versnelling van $1,60 \text{ m/s}^2$ geldt enkel in het midden van de brug en precies in de eigenfrequentie van 3,73 Hz. Als niet in deze frequentie wordt gelopen, is de respons van de brug vele malen kleiner (fig. 10). Om dit aan te tonen, is een analyse gemaakt van de respons van het brugdek onder een dynamische belasting van tien personen die in het midden van de overspanning staan te springen bij verschillende frequenties.

Er is een scherpe piek te zien bij de eigenfrequentie van 3,73 Hz en een grote afname zodra daar iets van wordt afgeweken.

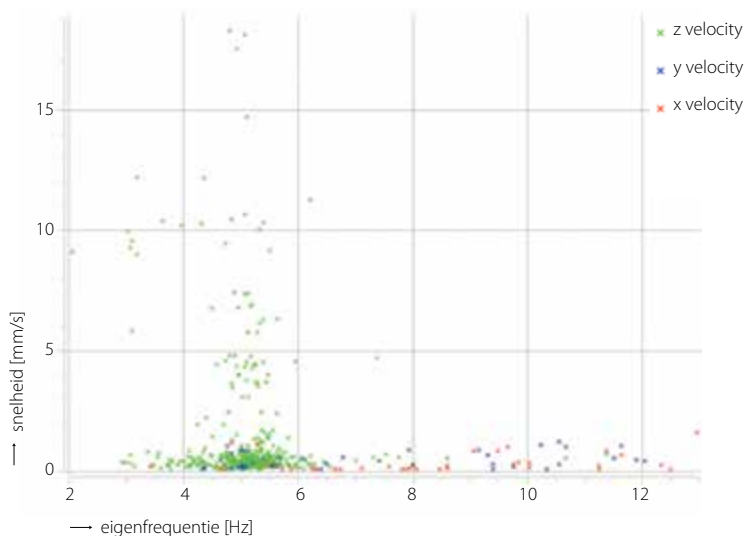
Wanneer de springfrequentie onder de 3 Hz komt, is de respons al circa tien keer zo klein. De versnelling die bij deze groep gebruikers optreedt, zal dus ruim onder de berekende maximale $1,6 \text{ m/s}^2$ liggen. Daarnaast ontstaat er geen zichtbare piek bij de halve of dubbele eigenfrequentie. De brug is dus niet gevoelig voor een dergelijke belasting.

Nameting eigenfrequentie

Na oplevering van de brug is de eigenfrequentie in het werk gemeten met behulp van een trillingsmeter (fig. 11). De brug is hierbij op verschillende manieren aangeslagen. Eerst door met een groep van acht mensen in het midden van de overspanning te springen. Daarna is de brug eerst door één hardloper belast en daarna door twee, vier, zes en uiteindelijk door een groep



10



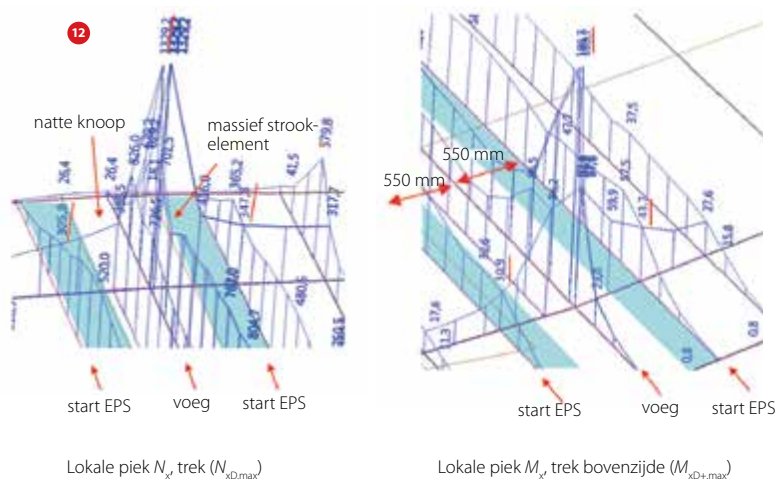
11

van acht hardlopers. Tot slot is de groep van acht nog marcherend over de brug gelopen. Dit laatste bleek zoals verwacht de ergste trillingen op te leveren.

De uitkomsten van de meting waren gunstiger dan berekend. De dominante eigenfrequentie bleek de tweede-orde-eigenfrequentie van 5,4 Hz te zijn met een versnelling van maximaal $1,5 \text{ m/s}^2$. De eerste-orde-eigenfrequentie was 2,7 Hz, maar resulteerde in aanzienlijk kleinere amplitudes.

Ook de horizontale eigenfrequentie van de brug in dwarsrichting is gemeten. Die bleek boven de 5 Hz uit te komen met zeer kleine amplitudes.

Op basis van deze uitkomsten kan worden geconcludeerd dat het comfort van de brug voldoet. De berekende waarden waren dus aan de veilige kant, maar ook weer niet zo veilig dat ze een te conservatieve constructie hebben opgeleverd.



Doorsneden worden belast door combinaties van trek, buiging, dwarskracht en wrijving in alle richtingen. Door de rekenmethode van SCIA en de complexe vormgeving ontstaan grillige spanningsverdelingen in de doorsneden die niet gemakkelijk kunnen worden omgezet naar een benodigde wapeningshoeveelheid (fig. 12). Om de wapening te kunnen toetsen en de beperkingen van SCIA te ondervangen, is een praktische methodiek ontwikkeld. Een belangrijk onderdeel van de methodiek is de wijze waarop de vezels worden meegerekend. In het kader van dit artikel zou het echter te ver gaan dit helemaal toe te lichten. Door professor Walraven is een second opinion uitgevoerd en hij heeft geoordeeld dat de gehanteerde rekenwijze innovatief, maar tegelijkertijd voldoende conservatief is.

Wapening dek en ondersteuning

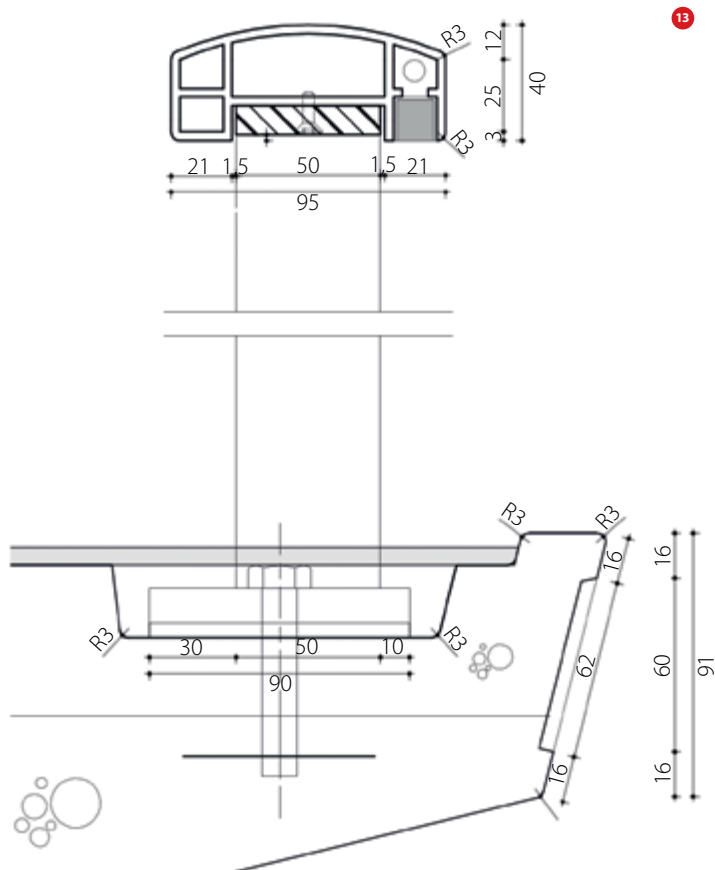
De basiswapening van het brugdek en de V-vormige ondersteuning is bepaald aan de hand van de benodigde stijfheid van de doorsneden. De sterkte van de doorsneden is hierdoor in de meeste gevallen veel hoger dan noodzakelijk. Daarom is de sterkte van de doorsneden getoetst op basis van de aanwezige wapening. Getoetst is of de krachten uit zowel de 3D-EEM-berekening als de 2D-raamwerkberekening lager zijn dan de aanwezige capaciteit. De krachten zijn in beide berekeningen bepaald met een semi-lineair-elastische berekening. De programma's rekenen lineair-elastisch. Op basis van de krachtwerking is echter handmatig per element de bijbehorende stijfheid bepaald en vervolgens ingevoerd in het programma.

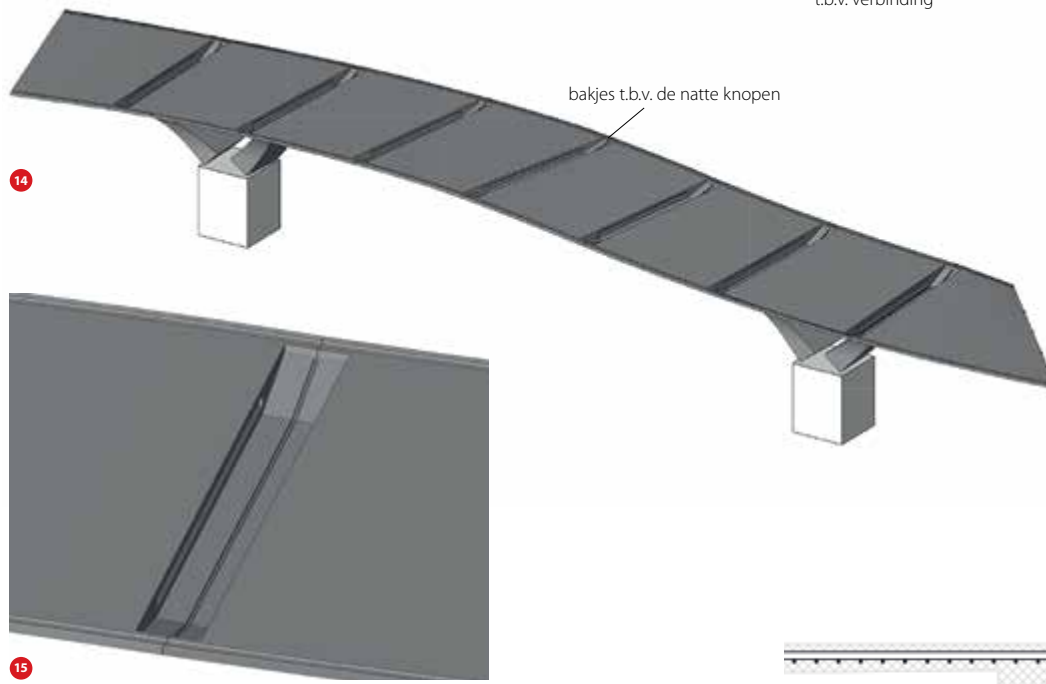
Hierna is de krachtsverdeling herberekend. De raamwerkberekening geeft hierbij een goed beeld van de totale krachtwerking in de hoofdrichting en de totale krachten die in de doorsneden optreden. De 3D-EEM-berekening geeft een goed beeld van het effect van de S-vorm van de brug en de krachtwerking in dwarsrichting. Daarnaast laat deze berekening zien waar spanningsconcentraties optreden.

Berekenen van de krachtwerking en doorsnedecontrole van de wapening met SCIA lijkt wellicht erg voor de hand liggend. Dit is hier echter geenszins het geval. SCIA baseert de berekeningen namelijk op het 'normale moment-vloeicriterium'. Deze methode heeft een aantal beperkingen die onder andere door professor Blaauwendraad uitgebreid zijn omschreven [7]. De belangrijkste beperking is de overschatting van de sterkte bij hoge wapeningspercentages en het optreden van aanzienlijke wrijving. Precies datgene wat bij de Catharinabrug speelt. Ook wordt in de berekening gebruikgemaakt van de theorie van Mindlin. Dat betekent dat de wrijving in een doorsnede niet eenvoudig kan worden bepaald, maar dat deze uit twee componenten moet worden samengesteld. De wringschuifspanning is daarin goed te achterhalen. De grootte van de dwarskrachtcomponent uit wrijving is echter lastig te bepalen doordat deze in de uitvoer is gecombineerd met de normale dwarskracht.

Balustrade

De balustrade bestaat uit spijlen die onzichtbaar met het dek zijn verbonden. Dit is gedaan door de voetplaten in een gootje te bevestigen en vervolgens aan te gieten met gietmortel K70 (fig. 13). Dit betekent wel dat de constructieve rand, die al slank was gehouden, nog eens is verjongd. Met behulp van beproevingen is aangetoond dat de ankers – ondanks de geringe betondoorsnede – de belastingen konden opnemen. De vezels zorgden ervoor dat een zeer grote uittrekkegel ontstond





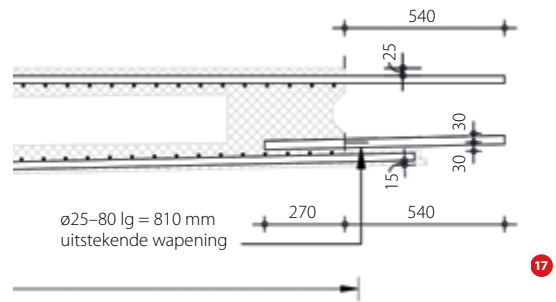
- 14 Opdeling brug in acht elementen
- 15 Inkassing (bakjes) in de elementen t.b.v. verbinding

- 16 Doorsnede natte knoop tussen twee elementen
- 17 Stekken ter plaatse van natte knoop tussen brugdeelementen
- 18 De stekken uit de elementen grijpen als een kam in elkaar

om de krachten op te nemen. Op de balusters is een speciaal geëxtrudeerde en in vorm gewalste reling met led-sfeerverlichting aangebracht (foto 3).

Opdeling prefab beton (JointCast)

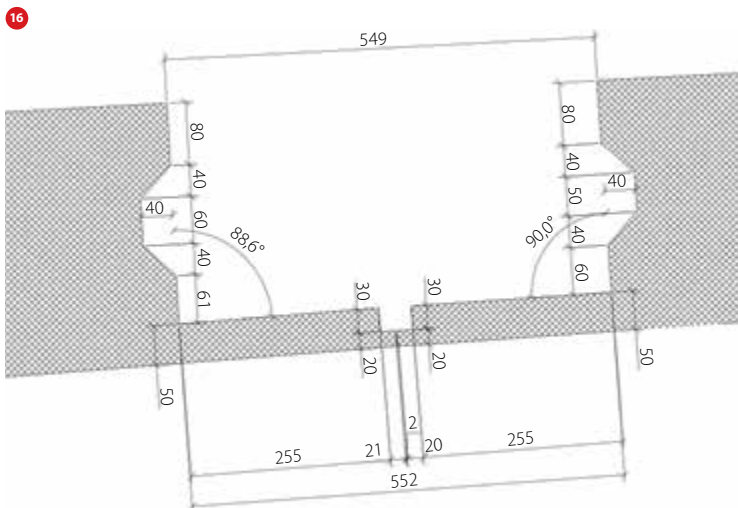
Het brugdek is in de lengte opgedeeld in acht elementen die ter plaatse aan elkaar zijn gestort (fig. 14). Dit was nodig vanwege de beperkte ruimte op locatie, maar ook omdat het toegepaste UHSB eigenlijk alleen in een fabriek goed is te verwerken. De elementen zijn met het speciaal voor natte knopen ontwikkelde UHSB JointCast aan elkaar gestort. De sterkte van dit materiaal bedraagt circa 170 N/mm² en het vezelpercentage is met 6% hoger dan dat van CRC.



Om een onzichtbare verbinding te realiseren, zijn inkassingen in de elementen gemaakt (bakjes, fig. 15). Aan de onder- en zijkanten loopt een dunne schil door (fig. 16) en van bovenaf worden de bakjes volgestort en vervolgens weggewerkt onder de slijtlaag. De wapening van twee aansluitende dekplaten grijpt als een kam in elkaar (fig. 17, foto 18). Door de uitstekende aanhechting van het JointCast is maar een heel kleine overlap nodig.

Modelleren met Revit en Grasshopper

De brug is in 3D gemodelleerd met Revit en ook de productietekeningen zijn hiermee gemaakt. De dubbelgekromde elementen zijn hierbij met Grasshopper gegenereerd en vervolgens in Revit ingevoerd. Vooral het goed afstemmen van de elementen op elkaar zodat de koppelbakjes en de randen vloeiend in elkaar overlappen, bleek een heidens karwei. Uiteindelijk zijn er ook 2D-tekeningen gemaakt zodat alle partijen de vorm konden beoordelen en controleren. Daarbij bleek dat de vorm soms iets te complex was voor Revit om goed te maatvoeren. Er moest regelmatig worden 'gesmokkeld' met hulplijntjes omdat het programma z'n eigen vlakken en randen niet herkende en wilde maatvoeren. Andere softwarepakketten zijn ook getest, maar hadden elk zo hun eigen nadelen. Uiteindelijk bleek het vertrouwde Revit, aangevuld met Grasshopper en Rhino, het programma dat het snelst het gewenste resultaat opleverde. Er is echter nog flink wat verbetering mogelijk.





18

Conclusie

Voor de Catharinabrug is een zeer ambitieus ontwerp gemaakt, dat alleen in UHSB mogelijk was. De eisen lagen hoog en er werd veel verwacht qua onderbouw van de constructie. Door een optimale UHSB-mix toe te passen in combinatie met uitgebreide documentatie en ervaring, is het onhaalbare mogelijk gebleken. Het resultaat mag er wezen. Met een breedte van 6 m, een lengte van 36 m en een slankheid van 1:81 heeft Leiden er een zeer bijzondere brug bijgekregen. ☒

● LITERATUUR

- 1 Nalta, R. van, Hansen, T. Ultradunne balkons. *Cement* 2012/6.
- 2 Nalta, R. van, Huize Het Oosten. *BV-Nieuws* 3, 2014.
- 3 Nalta, R. van, Potentie UHSB groeit. *Cement* 2016/2.
- 4 Nalta, R. van, Berg, C. van den, Büdgen, J., UHSB voor kleinschalige bruggen. *Cement* 2015/3.
- 5 Grünwald, S., Köhne, H., Nio, M., Serafini, M., Verdonk, A., Nalta, R. van, Huijben, R., Mechtcherine, V., Gielbert, L., Filigraine UHSB Parkbrug. *Cement* 2012/6.
- 6 Beers, F., Trillingen van betonnen voetgangersbruggen, TU Delft, 2014.
- 7 Blaauwendraad, J., Plates and FEM, Surprises and Pitfalls. Springer Science + Business Media B.V., 2010.
- 8 Van Nalta, R., Let op bij ontwerpen met UHSB. *Cement* 2015/5.
- 9 Bache, H.H., Compact Reinforced Composite, Basic Principles, CBL Report No. 41, Aalborg Portland, 1987.
- 10 Aarup, B., Jensen, B.C., Bond Properties of High-Strength Fibre Reinforced Concrete, ACI-publication SP-180, Bond and Development of Reinforcement, 1998.

● PROJECTGEGEVENS

project Catharinabrug, Leiden
opdrachtgever Gemeente Leiden
architect DP6 architectuurstudio BV
constructieadviseur Pieters Bouwtechniek Delft BV
uitvoering Gebr. Schouls BV
leverancier UHSB Hi-Con Nederland BV

UHSB op basis van jarenlang onderzoek

Uitgangspunt vanaf dag een van het ontwerp was het maximale halen uit de mogelijkheden van UHSB. Dit kwam er in feite op neer dat het maximale moest worden gehaald uit de beschikbare kennis over dit materiaal. Voorschriften zijn er echter niet en buitenlandse normen als de Franse AFGC zijn alleen goed toepasbaar op zeer specifieke mengsels. Ook steunt de AFGC heel erg op ondersteuning van het ontwerp door beproevingen. Dit is iets wat in veel gevallen, ook hier, financieel en planningstechnisch niet haalbaar is. Er is dus geen UHSB van de plank dat een constructeur met wat formules uit de Eurocode kan toepassen [8]. De brug is daarom ontworpen met het UHSB *Compact Reinforced Composite* (CRC) van Hi-Con. Dit materiaal wordt gekenmerkt door een optimale korrelpakking en het achterwege laten van de grove toeslagmaterialen. Het is ontwikkeld in Denemarken in de jaren tachtig door Hans Bache [9], [10] en sinds die tijd zeer uitgebreid beproefd en gedocumenteerd. Bij de producent in Denemarken zijn vele duizenden pagina's beschikbaar aan testrapporten over bijna elke eigenschap. Dit bleek nodig ook, want de gemeente Leiden wilde een innovatieve brug, maar met zo weinig mogelijk risico. Werkelijk alles moest dus worden onderbouwd. Een dynamische E-modulus op $t \rightarrow \infty$ of 100 jaar duurzaamheid van een zwaarbelaste doorsnede met slechts 15 mm dekking en dooizouten worden niet vaak beproefd. Dankzij al het onderzoek dat in het verleden is uitgevoerd, kon de brug worden ontworpen.

Voor de Catharinabrug is een recent ontwikkelde variant gebruikt van het originele CRC i2. Deze CRC i3-mix is oorspronkelijk ontwikkeld voor windmolens met zware dynamische omstandigheden. Waar het standaard CRC is geoptimaliseerd voor zeer geringe doorsneden, zoals balkons van 60 mm, is deze mix juist optimaal voor iets grotere doorsneden als die van de Catharinabrug. De verwerkbaarheid van de mix is zeer lastig – vandaar onder andere de grotere doorsneden –, maar de dynamische stijfheid is aanzienlijk beter. Dit maakt de CRC i3 zeer geschikt voor slanke infraprojecten als de Catharinabrug. Er wordt nog steeds onderzoek gedaan naar nieuwe mengsels. Dit biedt kansen voor de toekomst voor nog uitdagender constructies.