

# WIT UHSB C200 ULTRABRUG IN EINDHOVEN VERLEGT GRENZEN BRUGGENBOUW

**Auteurs:** Dil Tirimanna, Jan Falbr

FDN engineering + construction



## Abstract

Een nieuwe enkele-overspanning voetgangersbrug; een Ultrabrug van ultrahogesterktebeton (UHSB) is gebouwd en opgeleverd op 10 juni 2015 in Eindhoven, Nederland. Het architectonisch en constructief ontwerp is gebaseerd op een analyse naar de behoeften vanuit verschillende opdrachtgevers voor bruggen in Nederland. UHSB heeft unieke eigenschappen, waardoor lichte, duurzame en onderhoudsvrije constructies kunnen worden ontworpen. De vraag vanuit de opdrachtgever was een lichte, verwijderbare brug met minimaal onderhoud en goed inpasbaar in de omgeving. De Ultrabrug over het Eindhovens Kanaal heeft een overspanning van 21,4 m en een breedte van 3,8 m. Het getoogde brugdek is opgebouwd uit vijf getoogde prefab koker-elementen met een polystyreen kern, die nagespannen worden door interne voorspankabels om de brug te vormen. De maximale hoogte van de dek-elementen is 0,4 meter. Hierdoor wordt een slankheid van 1/55 bereikt. De zijwanden van de kokers zijn schuin uitgevoerd, zodat de brug nog slanker oogt vanaf de zijkanten. De dikte van het bovendek is slechts 80 mm. De leuningelementen worden apart gegoten en later aan het dek bevestigd. De leuning heeft een bionische vorm met stutten van 50 mm dikte. De minimale betonsterkteklasse van het dek is C170 / 200. Om de voordelen van UHSB ten volle te benutten, zijn zowel staalvezels als traditionele wapening aangebracht met voorspanning.

**Zoek woorden:** bruggenbouw, UHSB, kokerbrug, staalvezels, onderhoudsvrij, lichte brug, duurzaam bouwen, voetgangersbrug.

## **1. Introductie**

In de laatste jaren is ultrahogesterktebeton (UHSB) uitgegroeid tot een meer erkend en gerespecteerd bouw materiaal in Nederland. Verschillende ingenieursbureaus en aannemers zijn zich bewust geworden van het potentieel van dit materiaal, dat nieuwe mogelijkheden in de huidige ontwerppraktijk kan brengen en een gat in ook de inframarkt kan vullen. Een toenemende vraag naar nieuwe duurzame en architectonische voetgangersbruggen is een van de belangrijkste mogelijkheden voor UHSB. FDN zag deze kans al acht jaar geleden, waarna in 2012 de eerste UHSB voetgangersbrug werd ontwikkeld en gebouwd in Rotterdam. In juli 2015 voltooide FDN een nieuwe voetgangersbrug voor de stad Eindhoven. Dit project is een perfect voorbeeld in de zin dat UHSB concurreerde met andere bouwmaterialen zoals staal, hout of composiet. De voorgestelde variant van de brug met UHSB won de openbare aanbesteding dankzij zijn uitzonderlijke duurzaamheids-eigenschappen en aantrekkelijke design en inpassing in de omgeving dat een cijfer 10 als beoordeling kreeg van de Gemeentelijke beoordelaars.

Dit document beschrijft deze innovatieve voetgangersbrug gemaakt van UHSB, die is ontworpen en gebouwd door FDN. Dit artikel is bedoeld om inzicht te geven in het gebruik van UHSB in een uitgevoerd project - van theoretische berekeningen tot praktische zaken, als de productie en testen.

## 2. Brug beschrijving

### 2.1 Algemeen concept

De nieuwe voetgangersbrug in Eindhoven, ook wel “Brug Zwaaiikom” genoemd is gebouwd in een toekomstige woonwijk, waar architectuur en constructief ontwerp elkaar moeten aanvullen om een brug in te passen in de omgeving. Significante duurzaamheid, geen onderhoudskosten en een laag gewicht van het brugdek waren aanvullende wensen. De UHSB bruggen voldoen aan deze eisen en wensen. De brug is relatief licht (60 Tons dek), die eenvoudig te verwijderen is door een mobiele kraan.



Fig. 1 Voetgangersbrug Zwaaiikom, gebouwd in Eindhoven, Nederland - 3D visualisatie tender fase

### 2.2 Dek

De voetgangersbrug heeft een totale lengte van 25,6 m, een overspanning van 21,4 m en een breedte van 3,8 m. Het brugdek is opgebouwd uit vijf prefab elementen; elk met een lengte van 4,4 m. Deze elementen worden later op een ondersteuning tegen elkaar geplaatst en nagespannen met vijf gebonden strengen (voorspankabels). Het dek heeft de vorm van een boog met een constante radius en dwarsdoorsnede als een kokerbalk met polystyreen kern. De totale hoogte van de ligger is slechts 0,4 meter. Deze kleine hoogte resulteert in een slankheid rond 1/55. De bijbehorende bruggen van standaard beton hebben normaal slankheid rond 1/30. De zijwanden van de ligger hellen naar elkaar onder de hoek van 25 °. De dikte van de koker zijwanden zijn 100 mm. De dikte van het bovenste dek is slechts 80 mm en het wordt verondersteld de belasting van een 12 Tons voertuig te kunnen dragen.

Het gehele dek is versterkt met staalvezels en klassieke wapeningsstaven. Deze combinatie van wapening en vezels (hybride constructie) maakt UHSB echter erg taai, omdat anders bros gedrag van het materiaal zowel zou leiden tot micro-scheuren als grootschalige scheuren. Het wapeningspercentage van het dek is relatief groot.

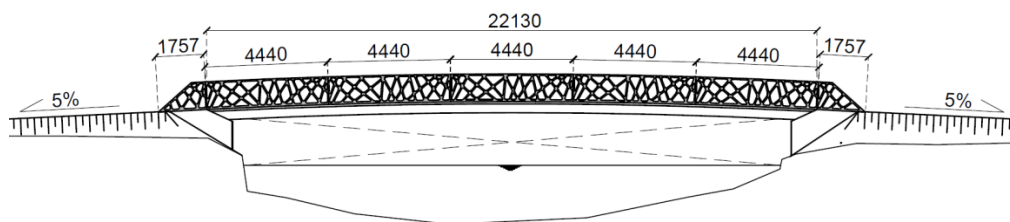
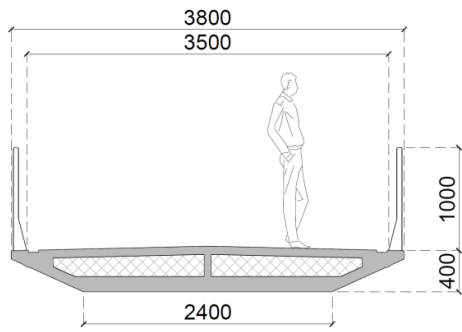


Fig.2 Zijaanzicht brug



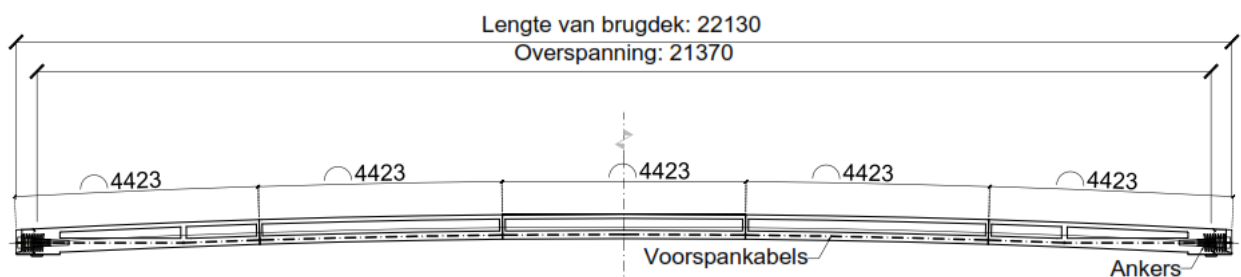
**Fig. 3** Dwarsdoorsnede van het brugdek.

### 2.3 Na-spannen

Het brugdek is na-gespannen door vijf gebonden strengen voorspanstaal. Elke streng heeft 13 draden. Een relatief grote voorspanning kracht is toegepast. De dwarsdoorsnede is onder een druk van 17 MPa. Het verankeringsysteem is gelijk aan de beide einden van het dek. Het voorspannen zelf wordt uitgevoerd aan slechts één zijde van het dek. Door de grote slankheid van de brug, moet bijzondere aandacht worden besteed aan het ontwerp, betreffende splejten van het beton bij het spannen. De grootte van de verankeringsbuis bepaalde de dikte van de bodemplaat. Helaas is er geen kleiner voorspanstelsel te vinden en is hierdoor de dikte van de bodemplaat slechts beperkt tot 150 mm. Extra wapening wordt toegepast in de onderste plaat tegen uitspatten van de voorspanbuis uit het beton sinds de dekking op de buis slechts 30 mm bedraagt. Relatief grote autogene krimp en verhardingskrimp ( $\epsilon_a = 550 \text{ } \mu\text{m} / \text{m}$ ;  $\epsilon_s = 150 \text{ } \mu\text{m} / \text{m}$ ;  $t = \infty$ ) is aangenomen voor de bepaling van voorspanverliezen.



**Fig. 4** Opbouw van voorspanning kanalen in het brugdek



**Fig. 5** langdoorsnede van het dek met verankering van het voorspanstelsel.

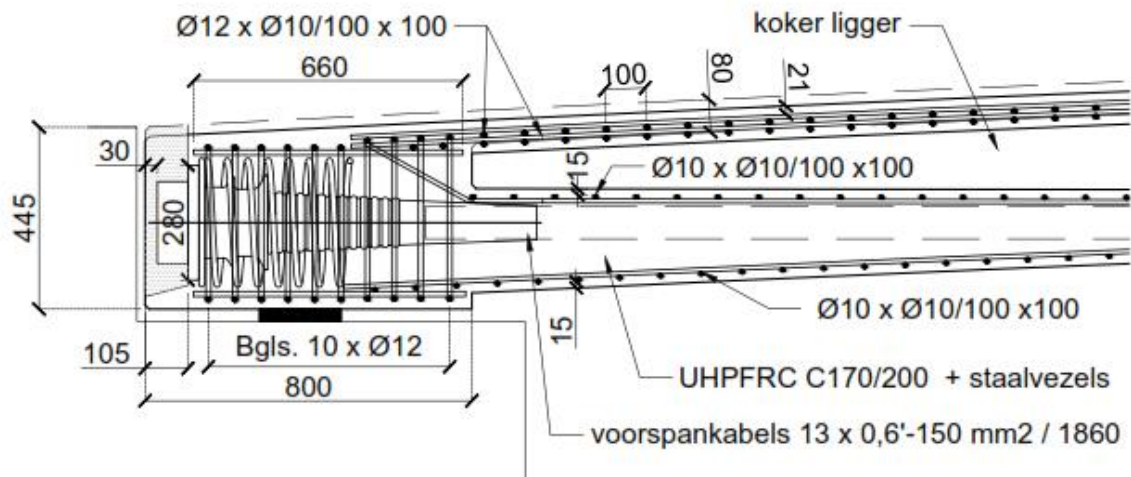


Fig. 6 langsdoorsnede van het anker. Standaard wapeningskorven rondom ankers en in het dek

## 2.4 De leuning van UHSB

De leuning elementen van de brug zijn ook gemaakt van UHSB C110/130. De elementen worden apart gegoten en later vast gebouwd aan het dek. Deze railing draagt niet bij aan de totale draagkracht van de brug, maar moet wel bepaalde vandalisme weerstaan. Naast de horizontale belasting van 3kN/m is ook een belasting door een zwaai van een stalen stang (vandalisme) in rekening gebracht op de leuning. De leuning heeft een bionische vorm en de schoren zijn willekeurig verdeeld. Dankzij de hoge sterkte van het beton zijn de schoren slechts 50 mm dik. De leuning wordt door een speciaal rail anker systeem op het dek bevestigd. Deze rails zijn vooraf gegoten in het dek.

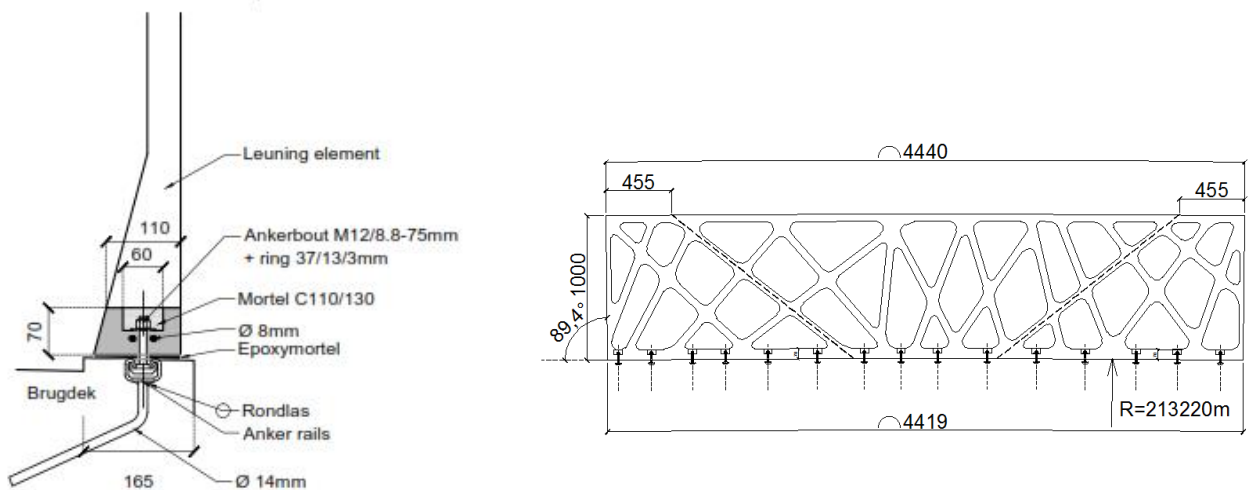


Fig. 7 leuning verankering in dek en zijaanzicht

## 2.5 Materiaal

De minimale betonsterkteklasse dat is gebruikt voor het dek is C200. Dit betekent dat de minimale druksterkte gelijk is aan orde 200 N/mm<sup>2</sup>. Dit betonmengsel is benodigd om zo slank te kunnen construeren. Een hoogwaardige gecalcineerd bauxiet is gebruikt als aggregaat. De korrelgrootte van het aggregaat ligt in het bereik 0-6 mm. Wit Portland cement 52,5 met snelle uitharding is gekozen voor de brug als bindmiddel. De water-bindmiddelverhouding is zeer laag, rond 0,17. De goede hydratatie en thixotroop gedrag in verse toestand wordt verzekerd door andere toeslagstoffen en additieven zoals super-weekmaker en niet-gehydrateerde micro-silica. De vereiste kleur van de brug is romig beige, dit wordt bereikt door wit UHSB beton te maken en daarna een pigment toe te passen. Vooral het maken van wit UHSB was problematisch. De natuurlijke kleur van UHSB is donker grijs. Deze donkere kleur wordt veroorzaakt door de microsilica. Nu moest met verschillende soorten micro silica geëxperimenteerd worden om de lichte kleur te bereiken en ook de sterkte van C200 te behouden. Verder moest een pigment worden toegepast in het mengsel, voor het bereiken van de beige kleur. Het pigment vermindert ook de eindsterkte van het beton. De hoeveelheid pigment mag derhalve niet groter zijn dan 0,5% cement content. De taaheid en treksterkte-eigenschappen van het beton wordt bereikt door de aanwezigheid van vezels. Voor deze brug in Eindhoven, zijn rechte staalvezels gebruikt. De lengte van de vezels is 12 mm en de diameter is 0.4 mm.

UHSB is een bouw materiaal, die speciale zorg nodig heeft tijdens zijn verse toestand. Grote autogene krimp kan barsten veroorzaken in de elementen. De brug in Eindhoven is verdeeld in vijf kleinere elementen. De kans op een fout wordt dus verminderd door een betere controle van gieten en mengen. Zoals eerder vermeld, is het materiaal thixotroop en is werkbaar alleen onder een aanzienlijke toevoer van energie via trilling. De mallen werden derhalve op een trilltafel gefixeerd en middels 6 trilmotoren getrild.

## 3. Bijzonderheden in het ontwerp

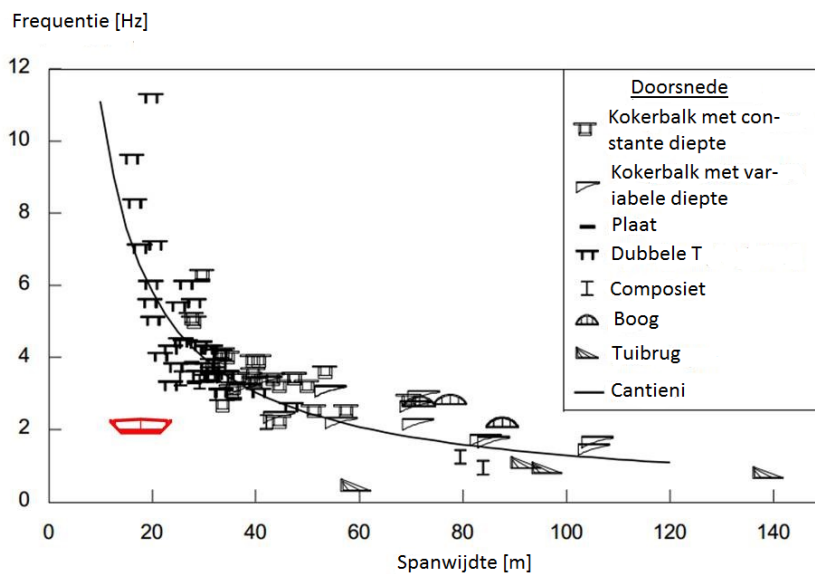
### 3.1 Slankheid

De hele brug is erg slank,  $1/55$ , en alle wanden van het dek zijn dun. De spankracht om het geheel aan elkaar te rijgen is daardoor relatief groot (13,5 MN in de gehele doorsnede), dit omdat de excentriciteit van de voorspanning klein is en daardoor minder effectief. De grote drukkracht in combinatie met een slanke doorsnede kan een stabiliteitsprobleem veroorzaken tijdens het voorspannen van de elementen. Grote precisie tijdens de productiefase moest worden gewaarborgd. Bovendien moest het ontwerp van het verankering systeem en holle leidingen de minimale ruimte in de betondoorsnede respecteren. Grote spijtkrachten, opbarsten en knik krachten moesten zorgvuldig worden gecontroleerd op ieder detail.



### 3.2 Dynamica

De natuurlijke frequentie van de brug is slechts 2.29 Hz. Deze waarde behoort tot het kritische bereik voor voetgangers en joggers, die kan stappen op de brug met dezelfde frequentie en onbedoelde verticale trillingen kan veroorzaken. Hiervoor moest een meer gedetailleerde berekening worden uitgevoerd. Realistische grensbelastingen (voetgangers dichtheid, aantal joggers, comfort of maximale versnellingen) moesten worden opgezet en met de klant worden afgesproken. Deze stap is essentieel, aangezien vele codes en aanbevelingen te algemeen zijn of te conservatief en niet overeenstemmen met de realiteit. Meer gedetailleerde berekeningen zijn uitgevoerd in samenwerking met dynamica specialisten. De meest voorkomende methoden zoals SDOF en Response spectra methode lijkt nog steeds te conservatief te zijn, omdat ze zijn gebaseerd op niet-realistische belastingen en vereenvoudigde constructieve eigenschappen. De dynamische berekening is derhalve aangevuld met extra differentiaalvergelijkingen die de randvoorwaarden nauwkeuriger beschrijven. De hele berekening werd ook ondersteund door een waarschijnlijkheid studie, die de kans op het optreden van een belasting beschouwt en de daaruit voortvloeiende constructieve reactie onderzoekt.



**Fig. 8** Vergelijking van de natuurlijke frequenties tussen de "Zwaaikom " brug in UHSB en bestaande bruggen met verschillende doorsnedes. Het kan worden afgeleid dat de bruggen van UHSB een lagere eigenfrequentie hebben en verschuift de gemiddelde curve naar beneden.

Mathematische beschrijving van het geval wanneer voetgangers en joggers over de brug wordt over het algemeen uitgedrukt door de volgende vergelijking:

$$m_n \ddot{q}_n(t) + c_n \dot{q}_n(t) + k_n q_n(t) = \left( P \sin(\Omega t) \sin\left(\frac{n\pi}{L} vt\right) \right) [H(t) - H(t - L/v)]$$

De linkerkant van de vergelijking beschrijft de structurele omstandigheden zoals modale massa ( $m_n$ ) of van modaal demping ( $c_n$ ) per Eigen modus. De rechterzijde geeft de belasting op de brug waar belastingen van voetgangers / joggers worden beschreven door een harmonische functie in combinatie met damp functie ( $H(t)$ ).

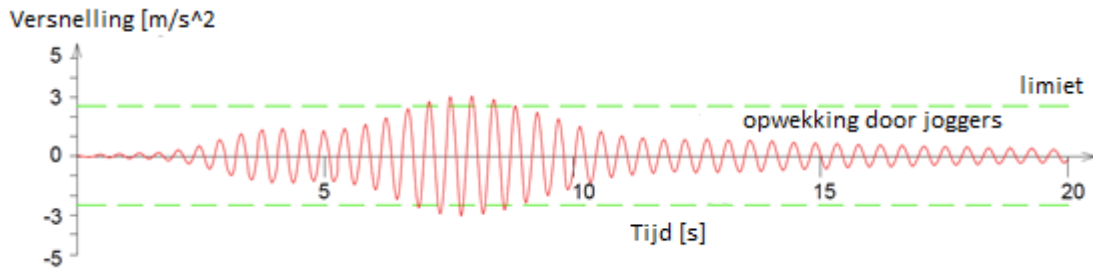


Fig. 9 Een voorbeeld van dynamische respons van de structuur. 37 Joggers lopen over de brug.

### 3.3 Gebrek aan richtlijnen

Het ontwerp van deze brug werd gedeeltelijk beïnvloed door het feit dat er nog steeds een tekort aan begrijpelijke en betrouwbare codes en aanbevelingen zijn voor UHSB. Wil men volgens de Eurocodes ontwerpen dan is dit slechts mogelijk tot betonsterkteklasse C110/130 (zeer hoge sterkte beton ZHSB-niet UHSB). Wij wilden bij deze brug tot het uiterste gaan om de slankst mogelijke brug in beton te ontwerpen. Hiervoor is een hogere betonkwaliteit een noodzaak. Eigen rekenregels moeten hierbij worden gehanteerd in vergelijking met de Franse aanbevelingen en de constructie moet ook getest worden om de opdrachtgever garanties te kunnen geven betreffende de veiligheid. Het testen wordt verricht door middel van het vullen van waterbakken en is vrij eenvoudig in een middag te verrichten.

Bij het ontwerpen van deze brug was er de neiging om conservatief te zijn op sommige aspecten vanwege het ontbreken van richtlijnen. Scheurvorming bijvoorbeeld, in UHSB is niet volledig beschreven en geaccepteerd in praktische richtlijnen. Dit was ook een probleem in het ontwerp van de "Zwaikom Brug". Aangenomen werd dat de gehele doorsnede van het dek is samengedrukt in elk gewenst moment tijdens het belasten. Door deze aanname wordt de brug zeer duurzaam, maar anderzijds wordt het ontwerp meer conservatief. Trek transversale spanningen in het bovendeck werden opgelost op soortgelijke wijze als bij normaal beton. De maximaal toelaatbare spanningen in de trekwapening met betrekking tot de maximale scheurwijdte zijn beperkt op dezelfde wijze als vermeld in EN 1992-1-1. Voor de berekening van de buigtreksterkte van een doorsnede in UGT, is de bijdrage van staalvezels in de trekzone van het beton verwaarloosd en is aangenomen dat de verdeling van de spanningen in de drukzone lineair zijn, zonder plastische herverdeling. Door de relatief brosse eigenschappen van UHSB is de maximale rek beschouwd op ongeveer 0,2%. De negatieve impact van willekeurige vezeloriëntatie kan de treksterkte van het beton verminderen. Dit komt door de zogenaamde K, waarbij globale en lokale effecten van spanningen onderscheid worden. Voor het geval van de brug in Eindhoven, is een globale  $K = 1,75$  gebruikt voor de gehele berekening.

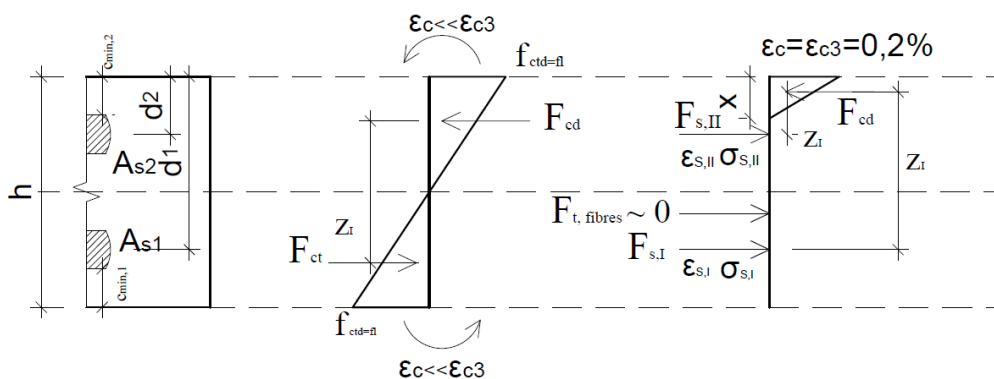
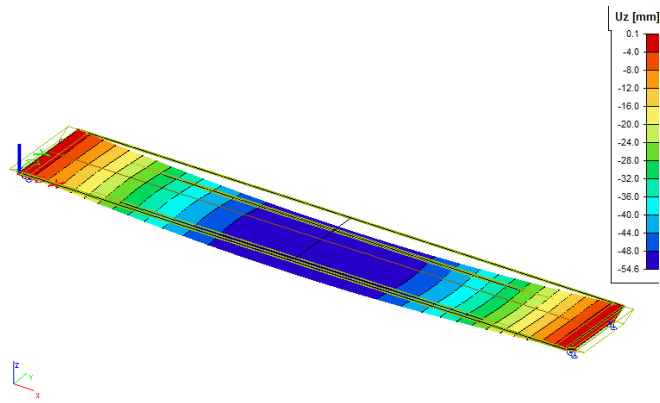


Fig. 10 Berekening van het moment van de top plaat en de daarmee samenhangende aannames is gemaakt voor UHSB. De herverdeling van de spanningen in de afbeelding links komen overeen met de niet gescheurde doorsnede. De figuur rechts is gescheurde doorsnede.

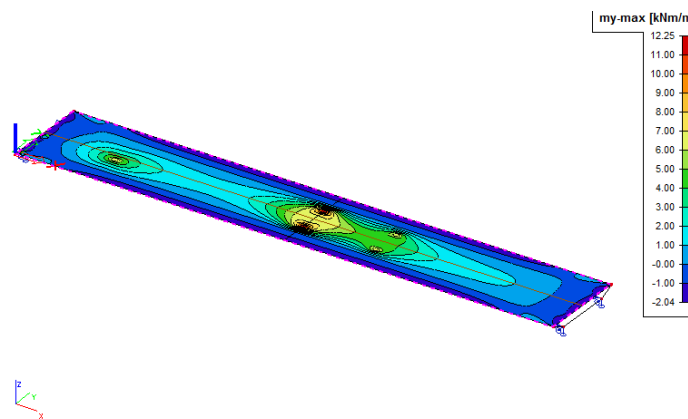


### 3.4 Computermodellen

Verschillende computermodellen zijn uitgevoerd voor de simulatie van het globaal gedrag van de brug als mede de lokale invloeden, zoals splejten, piek spanningen rond het ankerhoofd of de verdeling van de spanning rond het wiel van onderhoudsvoertuigen. Het hele brugdek is gesimuleerd door twee modellen. Een bestaat uit 1D elementen en de tweede uit 2D elementen. Materiaaleigenschappen moesten bovendien worden ingesteld, omdat deze programma's niet berekenen met UHSB.



**Fig. 11** verticale vervorming van het brugdek onder gelijkmatig verdeelde belasting volgens EN-1991-2.



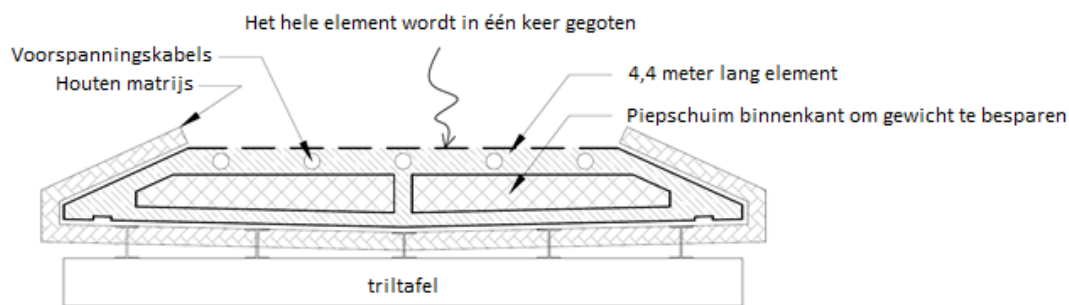
**Fig. 14** Momentverdeling in de bovenste dek onder de last combinatie envelop met het onderhoud van de voertuigen.

## 4. Productie

### 4.1 De productie van het dek

Het brugdek bestaat uit vijf gesloten, geprefabriceerde elementen, die later tegen elkaar zijn geplaatst op een ondersteuningsconstructie en nagespannen door een voorspansysteem. Er zijn drie identieke, tussenliggende elementen en twee eind-elementen met een vaste eind-balk met de ankerhoofden. Vanwege de boog en constante kromming over de gehele lengte van het dek is slechts 1 mal nodig voor de productie. De tussen elementen werden uitgevoerd door het plaatsen van een schot in de mal.

Een grote triltafel werd geïnstalleerd onder de mal. Trilling van deze tafel verzekert de juiste vloeibaarheid van het verse beton in alle delen van de mal en ook het ontsnappen van lucht uit het mengsel. Elk element is in een stort gemaakt, dit om stornaden en de ontwikkeling van ongewenste spanningen in het dek te vermijden. Het hele element is onderste boven gestort en later gekeerd. Een van de redenen hiervoor is een betere controle van het beton tussen de voorspanelementen en ankers. De tweede reden is dat de geprofileerde rubber matten op de bodem van de mal kunnen worden geplaatst t.b.v. profilering van het dek en uitsluiten van benodigde asfalt- of slijtlagen op het dek voor stroefheid.



**Fig. 13** Opstelling voor het storten van een dek element. De rib in het midden van de doorsnede heeft geen noodzakelijke constructieve functie. Het staat wel een betere controle van het storten van de onderste plaat toe.

Het verhardingsproces was traag vanwege het toepassen van een vertrager. Normaal is de tijd tussen het mengen en gieten in een mal niet langer dan 20-30 minuten. De keuze van de productie plaats is dus van essentieel belang. Verder mag de temperatuur van de productieplaats niet hoger zijn dan 30 ° C anders moeten aanvullende voorzorgsmaatregelen worden getroffen om te voorkomen dat overmatig scheuren van de betonoppervlakte ontstaat. Het beton wordt gewoonlijk gegoten uit een kubel met een hoogte van ongeveer een meter. De grote hoogte van het storten geeft een betere verdichting van het beton. De oriëntatie van de vezels is willekeurig en er is geen speciale aandacht gegeven om een homogene verdeling te verzekeren. De brug in Eindhoven is geproduceerd zonder enige thermische behandeling. Alleen op het stortvlak werd curing gespoten en glad gestreken en bedekt met een plastic zeil direct na het storten.

### 4.2 Productie van de leuning

De railing elementen zijn gemaakt van UHSB C150/180. De complexiteit van de vorm en slanke stutten vergt een grote hoeveelheid werk. De master railing mal is gemaakt van hout. De openingen tussen de steunen zijn gevuld met polystyreen blokken, om de krimp te kunnen weerstaan zonder vastklampen tegen ontkisten. Vanwege de complexe vorm van de gaten, moest een automatische snij machine gebruikt worden voor de productie van PS blokken. Verschillende tril-motoren werden gehecht aan de mal.

## 5. Testen

Wegens gebrek aan relevante codes en aanbevelingen met betrekking tot ontwerpen met UHSB betonkwaliteit C200, waren aanvullende testen nodig voor dit project om de veiligheid te kunnen garanderen. Tot kwaliteit C110/130 kan volgens de Eurocodes en aanvullingen worden ontworpen. Voor hogere betonsterkteklassen als UHSB C200 kunnen de Franse aanbevelingen worden toegepast, waarvoor al vele relevante voorbeelden zijn. De opdrachtgever kan echter eisen voor een proefbelasting welke eenvoudig in een middag kan worden opgesteld en beproefd met toepassing van waterbakken en meten van de doorbuigingen van het dek en vergelijken met de berekende waarden. Beide testen van het materiaal in een laboratorium en full-scale testen van de hele brug waren geëist door de klant, de Gemeente Eindhoven. Het testen van het beton voor de leuning en dek-elementen zijn uitgevoerd door een betonlaboratorium en onafhankelijk onderzoeksinstituut. De meeste aandacht is besteed aan de definitieve kleur van beton, omdat het doel was om romige beige tinten te bereiken. De full-scale test werd opgesteld om de doorbuiging van het brugdek te controleren door toepassing van een gelijkmatig verdeelde belasting BGT 4,3 kN / m<sup>2</sup>.

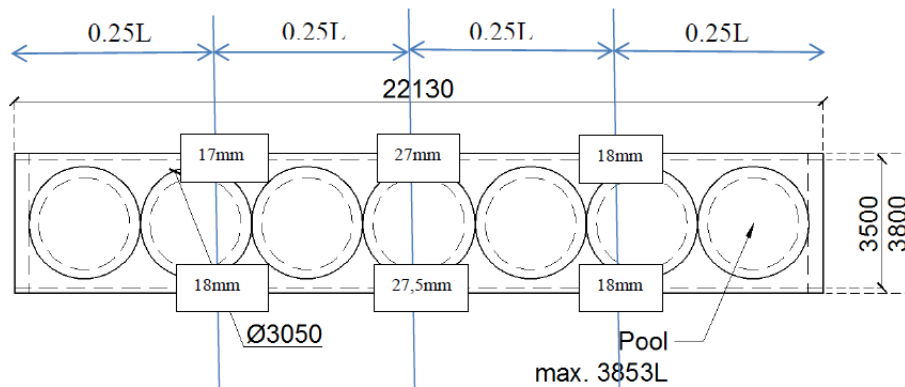


Fig. 14 Proefopstelling met waterbakken en doorbuiging metingen bij  $q = 4,3\text{kN/m}^2$

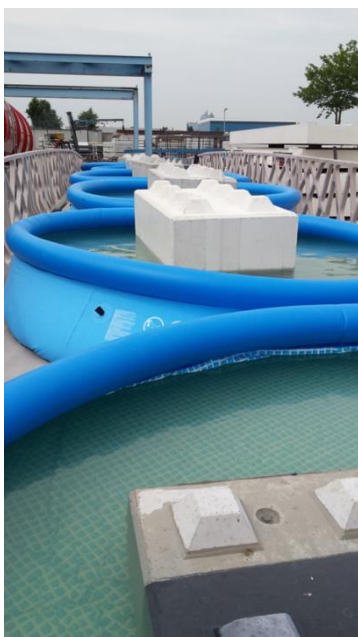


Fig. 15 Opstelling belasting met waterbakken en betonblokken op het dek



**Fig. 16** Geen indringingsfront bij de geleverde UHSB kubussen beton 3 dagen hoge waterdruk



**fig. 17** Indringingsfront bij normaal B35 3 dagen hoge druk waterspuiten

## 6. Conclusie

Dit project heeft aangetoond dat UHSB kan concurreren met traditionele materialen qua prijs en dat het voornaamste voordeel betreft de slanke doorsneden en de onderhoudsvrijheid van de brug. De initiële kosten zijn vergelijkbaar met de mogelijkheden met andere bouwmaterialen. Uitzonderlijke duurzaamheid en lage onderhoudskosten van UHSB maakt dit materiaal nog meer rendabel in de tijd. Het werd verondersteld dat prefabricage de meest effectieve manier van bouwen is voor UHSB vanwege de slechte verwerkbaarheid. Kleinere elementen verminderen het risico van de productie-uitval en de herhaling onderdrukt de kosten laag. Bij dit project werd echter aangetoond dat door toepassing van superplastificeerder de verwerkbaarheid aanzienlijk kan worden verlengd en zelfs het brugdek storten in een stort tot de mogelijkheden behoort.



**Fig. 18** Transport van het brugdek naar locatie per vrachtwagen

## **Informatie**

Voor meer informatie over onderhoudsvrije UHSB bruggen, neem contact met ons op via [info@ultrabrug.nl](mailto:info@ultrabrug.nl) of ga naar [www.ultrabrug.nl](http://www.ultrabrug.nl)

## **Referenties**

- [1] Falbr, J. (2014), Berekeningsrapportage brugdek UO - Officieel document van Zwaaiikom brug, Amsterdam, Nederland.
- [2] Falbr, J. (2014), 3D Computermodellen - Officieel document, Amsterdam, Nederland.
- [3] AFGC / SETRA. (2013), Ultra-High Performance Fibre-Gewapend beton - aanbevelingen, Frankrijk.
- [4] Beers F., Buur M. (2014), Dynamische Berekening Zwaaiikom - Dynamiek van Zwaaiikom brug, Amsterdam, Nederland.
- [5] BURDET Olivier L., CORTHAY Stéphane; Dynamische Testen Load Zwitserse Bruggen, Zwitserse Federale Instituut voor Technologie, Lausanne, Zwitserland

