



Concept voor modulaire brug in vezelversterkt ultra-hogesterktebeton

Modulaire UHSB brug beproefd

Bij Nederlandse gemeenten bestaat er behoefte aan onderhoudsvrije bruggen, zo bleek uit marktonderzoek. Om op deze behoefte in te spelen, heeft FDN Engineering een concept ontwikkeld voor modulaire bruggen in vezelversterkt ultra-hogesterktebeton. Tegelijkertijd was de gemeente Rotterdam bezig met een eigen onderzoek naar verkeersbruggen van ultra-hogesterktebeton. Besloten werd de krachten te bundelen. De eerste brug is onlangs geproduceerd en beproefd.

Ontwikkeling

De ontwikkeling van modulaire UHSB bruggen is uitgevoerd door FDN in samenwerking met de gemeente Rotterdam (C. Blom en M. Said). De uitvoering en testen vonden plaats bij Oostzijde Beton BV te Zaandam.

Uit het genoemde marktonderzoek bleek dat de verschillende beheer- en onderhoudsafdelingen zeer tevreden waren met de huidige betonnen duikerconstructies. Ze vroegen zich af of het mogelijk was een dergelijke onderhoudsvrije constructie te ontwerpen voor een brug. Nader onderzoek wees bovendien uit dat vele honderden bruggen tot 20 m lengte aan vervanging toe waren. Mede hierdoor ontstond het idee een modulaire brug te ontwikkelen die op verschillende locaties kan worden ingezet. In samenwerking met de TU Delft werden de eerste concepten gemaakt.

Ontwerp

Bij het ontwerp van de brug bestonden de volgende uitgangspunten:

- onderhoudsvrij voor 100 jaar;
- economisch (kosten lager dan de huidige traditionele stalen, betonnen en kunststof bruggen).

Het zoeken naar een materiaal met een zo groot mogelijke duurzaamheid wees in de richting van ultra-hogesterktebeton (UHSB). Om economisch te kunnen construeren, was het de bedoeling de bruggen zoveel mogelijk te standaardiseren. Hierdoor kon met een standaardmal een brug met verschillende lengte, breedte en vormgeving van de leuning worden gerealiseerd.

Uiteindelijk werd voor de leuning een mal van hout ontwikkeld met polystyreen blokken ten behoeve van de sparingen. Voor de dekplaat werd een standaard mal toegepast.

De leuningelementen met lengte 4,3 m (foto 2) worden na het storten aan elkaar voorgespannen. De platen, ook met een lengte van 4,3 m, liggen op deze leuningelementen. Ze worden met een boutverbinding bevestigd aan de leuning (fig. 4). Deze boutverbinding is proefondervindelijk bepaald.

Materiaal en samenstelling

Vooraf is onderzoek uitgevoerd naar specifieke aanpassingen van het mengselontwerp met betrekking tot consistentie, vezel-doseringen, vezelcocktails en maximale korrel diameter. Voor de volledige brug van 18,9 m lengte en 3,4 m breedte is minder dan 10 m³ beton toegepast. Het gebruikte materiaal is een staalvezelversterkt UHSB met sterkteklasse C170/200. Deze sterkte wordt gehaald door de dichte microstructuur van de binder. Het ontwikkelde mengsel is samengesteld uit:

- gecalcineerd bauxiet in fracties van 0 – 6 mm;
- portlandcement 52,5;
- micro-silica;
- hulpstoffen;

- 200 kg staalvezels (0,4 mm diameter en 12,5 mm lengte);
- water-bindmiddelfactor (wbf) 0,16 – 0,17.

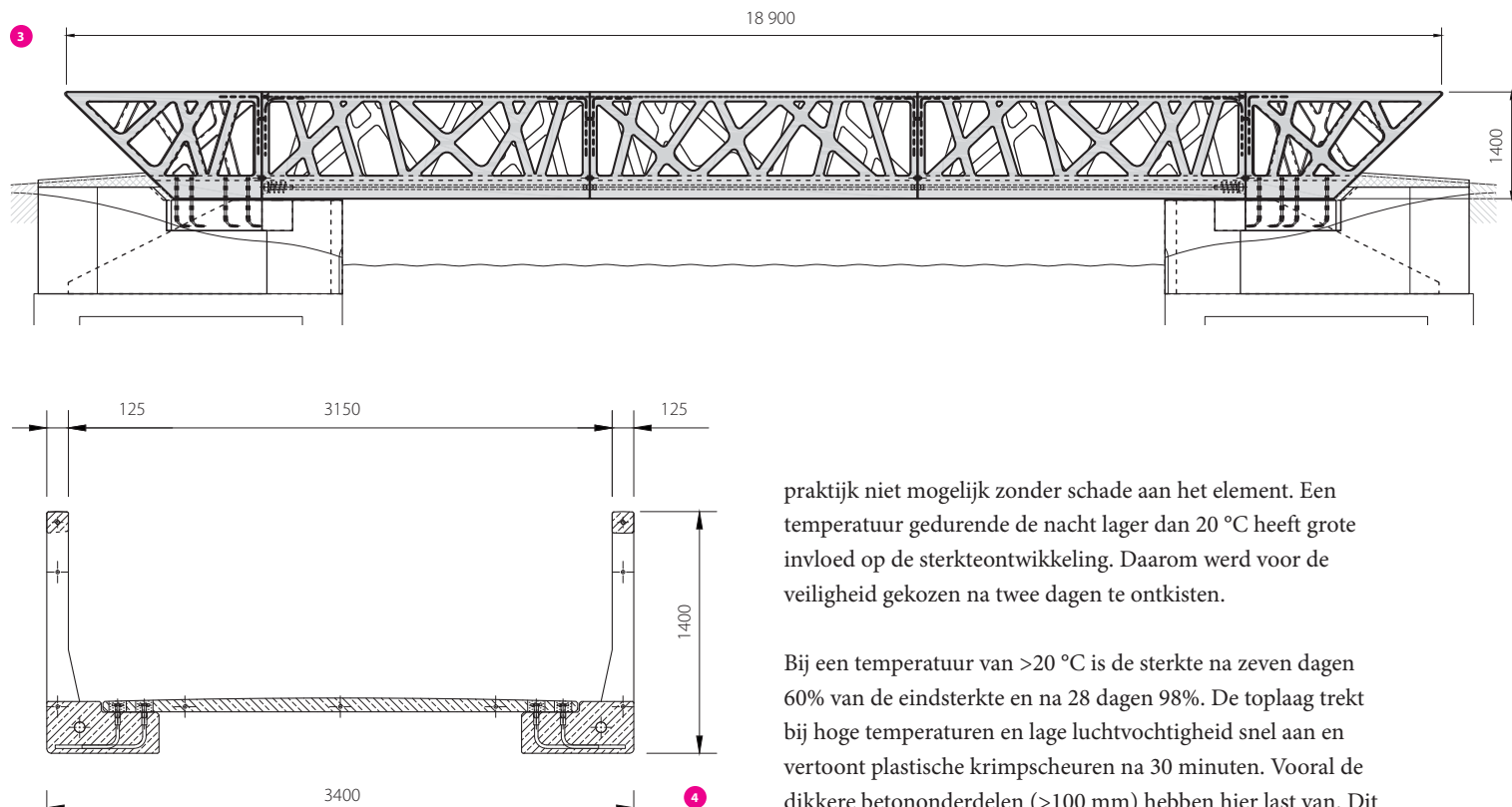
Constructie

Het voordeel van het toegepaste beton is de zeer hoge druksterkte. De rekenwaarde van de druksterkte is 130 N/mm². De rekenwaarde van de treksterkte is 4,3 N/mm² en die van de buigtreksterkte 7,1 N/mm². Hierbij is uitgegaan van [6]. Tijdens het storten van de elementen zijn proefkubussen gedrukt. De minimale druksterkte bedroeg 190 N/mm², de buigtreksterkte is gemeten op 18 N/mm².

De brug is ontworpen voor een variabele belasting van 5 kN/m² en 120 kN voertuigbelasting. In plaats van alleen staalvezels, is ook een wapeningsnet van Ø10-200 toegepast. Bij het dimensioneren van het dek bleek dat bij deze oplossing een grote slankheid mogelijk zou zijn. De toegepaste dekdikte bedraagt 60 mm. Rekentechnisch is 40 – 45 mm toelaatbaar (1/60 L) door het zogenaamde CRC-principe (Compact Reinforced Composite) toe te passen, zoals is ontwikkeld door Hans Henrik Bache (Aalborg Portland Denemarken) in 1986. Er is een bolling in het dek in breedterichting ten behoeve van het afwateren toegepast. De onderzijde van het dek is recht.

De leuning is ongewapend uitgevoerd en hebben een dikte van maximaal 125 mm. Ook hier had de dikte van de stijlen beperkt kunnen blijven tot <90 mm, indien hier tevens traditi-





onele wapening was toegepast. Dit bij een dekking op het wapeningsstaal van 15 mm. De benodigde dekking volgens de betrokken betontechnoloog was zelfs 10 mm, maar vanwege uitvoeringstoleranties is 15 mm aangehouden. Toepassing zonder traditionele wapening voor de leuning leek in eerste instantie eenvoudiger ten behoeve van de productiesnelheid. Echter, doordat hierdoor de doorsneden grotere dikten behoeven, is het storten, trillen en nabehandelen ingewikkelder dan het toepassen van eenvoudige wapeningsnetten. Achteraf gezien was een kleinere dikte dus waarschijnlijk beter geweest.

Praktijkervaring

Om een zo hoog mogelijke druksterkte te bereiken, is een relatief lage wbf toegepast. Hoewel nog hogere sterkten mogelijk zijn door aanpassing van het mengsel en/of temperatuurbehandeling, zal dit niet resulteren in een veel grotere besparing op materiaal, terwijl de kosten aanzienlijk hoger zullen zijn.

De lage wbf beïnvloedt echter de verwerkbaarheid (consistentie en aanvang hydratatie). Met deze lage wbf gedraagt het materiaal zich als een dikke thixotrope pap (foto 5), vooral bij temperaturen boven de 27 °C. Echter, door het toepassen van hoog frequente trillingen (in dit geval stoktrilnaalden) verandert dit gedrag in een plastische consistentie die goed verdicht.

De sterkteontwikkeling van UHSB is temperatuurafhankelijk. Zeker de eerste 24 uur heeft niet alleen de temperatuur grote invloed, maar ook de tijdsduur. De bedoeling was aanvankelijk na één dag te ontkisten, wat theoretisch mogelijk zou zijn. Ondanks temperaturen boven de 20 °C bleek dit echter in de

praktijk niet mogelijk zonder schade aan het element. Een temperatuur gedurende de nacht lager dan 20 °C heeft grote invloed op de sterkteontwikkeling. Daarom werd voor de veiligheid gekozen na twee dagen te ontkisten.

Bij een temperatuur van >20 °C is de sterkte na zeven dagen 60% van de eindsterkte en na 28 dagen 98%. De toplaag trekt bij hoge temperaturen en lage luchtvochtigheid snel aan en vertoont plastische krimp scheuren na 30 minuten. Vooral de dikkere betononderdelen (>100 mm) hebben hier last van. Dit zou men kunnen oplossen door een iets hogere wbf toe te passen (>0,16) en door te werken in een beter geconditioneerde ruimte.

Het UHSB werd gedoseerd in een dwangmenger. Na het droog voormengen, werd het aanmaakwater gedoseerd. Hierna werden staalvezels gedoseerd en werd nog enige minuten doorgemengd. De totale productietijd voor één m³ UHSB was ongeveer tien minuten. De dwangmenger loste door middel van een goot in een transportkubel die naar de stortlocatie werd gereden. Op de stortlocatie werd de kubel in een stortkubel gelegd. Deze tweede kubel werd met behulp van een bovenloopkraan tot circa 1 m hoogte boven de mal geplaatst. Door het beton van circa 1 m hoogte te laten vallen, werd een eerste verdichting bereikt en werd bij de dekplaten de wapening goed met beton omhuld. De staalvezeloriëntatie is zoals die uit de menger komt en is niet meer te beïnvloeden. Wel is deze vrij homogeen met een willekeurige vezeloriëntatie.

Voorspanning

De leuningelementen kunnen stabiel rechtop staan. Ze worden, afhankelijk van de te realiseren bruglengte, achter elkaar waterpas opgesteld. De kopse kanten worden enigszins opgeruwd met een bikhamer. Er wordt gezorgd dat deze echt vlak zijn voor het voorspannen. Een tweecomponenten-epoxylijm wordt op de kopse kanten aangebracht vlak voor het spannen. De verhardingstijd van de lijm bedraagt twee uur. De onderste voorspankabel wordt eerst op 10% van zijn voorspankracht gespannen om de lijm te laten uitharden. Dit gebeurt met behulp van geleidingsprofielen tussen de elementen, om te voorkomen dat de elementen in dwarsrichting verschuiven. Om het geleiden te vergemakkelijken, zijn teflon platen onder

- 3 De leuningelementen worden na het storten aan elkaar voorgespannen
- 4 De platen liggen op de leuningelementen
- 5 Door de lage wbf gedraagt het materiaal zich als een dikke thixotrope pap
- 6 Voor het proefbelasten van het brugdek worden waterbakken gevuld

de elementen aangebracht. Na het voorspannen van het onderste voorspanelement tot 100% wordt ook het bovenste voorspanelement in de leuning direct tot 100% voorgespannen. Hierna worden de voorspankanalen gegroot. Vervolgens worden de plaalementen geplaatst tussen de leuningelementen. De gains met de boutverbinding tussen leuning en platen worden aangestort met beton C170/200. De totale brug kan dus samengesteld worden in één dag. Na één week is de grout in de voorspankanalen en gains voldoende hard om in gebruik te worden genomen.



5

Proefbelasten brug

Naast controle van de gehanteerde berekeningswijze voor het ontwerpen van de brug, werd door Bouw- en Woningtoezicht Rotterdam geëist dat de brug werd proefbelast. Dit moest met 1,2 keer de variabele belasting van 5 kN/m^2 over het volledige dek van de brug (maatgevende belasting) en met een horizontale belasting tegen de leuning van 1,2 keer 3 kN/m^2 . De resultaten van de proefbelasting moesten overeenkomen met de berekende waarden voor het afgeven van de definitieve bouwvergunning.

De variabele belasting werd aangebracht door middel van waterbakken op het brugdek. Deze werden tot 60 cm hoogte gevuld (foto 6). De horizontale leuningbelasting werd aangebracht door middel van een tirvor (spanvoorziening om kabel te spannen) met krachtmeter (verbonden met kabels en stropen aan de leuning) om de 1 m in de lengterichting van de brug.

Metingen aan de doorbuiging van de brug in onbelaste en belaste toestand werden uitgevoerd door professor Walraven van de TU Delft. Ook werd de brug gecontroleerd op scheuren.

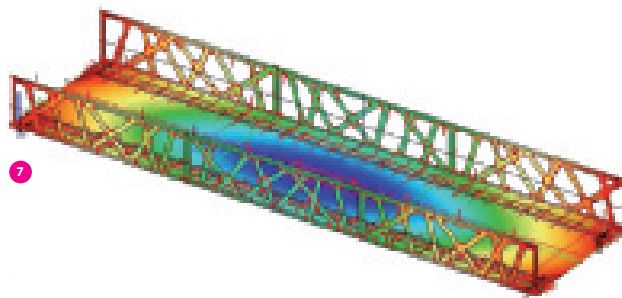


6

Tabel 1 Doorbuigingen constructie onder volledige belasting van 5 kN/m^2

	berekeningen 2D-model	berekeningen 3D-model	proefbelasting	toelaatbaar
u_z leuning midden	2,5 mm	2 mm	3 mm	21 mm
u_z dek midden	2,3 mm	1,7 mm	2 mm	4,5 mm
u_z totaal	4,8 mm	3,7 mm	5 mm	25,5 mm

- 7 3D-model van de doorbuigingen
- 8 Eindresultaat van de modulaire UHSB brug



De doorbuigingen van het 3D-model staan in figuur 7.

De gemeten waarden komen goed overeen met de berekende doorbuigingen. Hiermee is de gehanteerde berekeningsmethode dus gevalideerd.

Er was geen sprake van enige visuele scheurvorming bij belasten tot 20% boven de maximale gebruiksbelasting, ofwel 6 kN/m².

Uit de resultaten volgt dat het dek, met zijn 60 mm dikte, met gebruikmaking van traditionele wapening al redelijk geoptimaliseerd is qua doorbuigingen. De leuning echter kan minder stijf worden gemaakt door toepassing van wapening voor de sterkte en het hanteren van doorsnededikten van 90 mm in plaats van 125 mm (28% vermindering van de dikte).

Mogelijkheden brugsysteem

De modulaire bruggen zijn uit te voeren met verschillende leuningontwerpen. Architecten hebben hierbij de vrijheid zelf de leuning aan te passen aan de omgeving. Nu is er gekozen voor een vlakke brug, maar een getoogde brug, bestaande uit standaardelementen, is ook mogelijk en zal leiden tot kleinere betondoorsneden vanwege de boogwerking. Op eenvoudige wijze kunnen polystyreen elementen worden vervaardigd die in de mal worden gelegd ten behoeve van de benodigde vormgeving. Deze polystyreen elementen worden 3D gefreesd en zijn veelvuldig te hergebruiken.

Met de huidige mallen kunnen bruglengten tot 21,5 m en -breedten tot 5 m worden gerealiseerd. De bruggen zijn uit te voeren in verschillende kleuren.

Een aanvullend voordeel van dit modulaire systeem is dat de elementen voor een brug van 21,5 m lengte passen in een 20 voets zeecontainer met een te openen bovenzijde. Er wordt voldaan aan de eisen aan volume en gewicht. Daardoor kan

goedkoop worden getransporteerd. Hierdoor is er de mogelijkheid de bruggen in Nederland te produceren en te exporteren.

Conclusies project

Uit het project zijn verschillende conclusies te trekken:

- het is haalbaar uit twee kleine mallen (leuning en plaat) bruggen met een lengte tot 21,5 m en breedte tot 5 m economisch te produceren;
- slankheden van $1/60 L$ zijn realiseerbaar;
- de berekeningsmethode die is aangehouden door onze constructeurs, inclusief de gehanteerde materiaalsterkten, is correct;
- de combinatie van traditionele wapening en voorspanning leidt tot de meest optimale constructies;
- voor 100 jaar levensduur is een dekking benodigd van minimaal 10 mm; uit praktisch oogpunt is 15 mm aan te bevelen;
- het toegepaste beton is ook uitvoerbaar in zelfverdichtend beton, echter meer onderzoek is hiervoor noodzakelijk in verband met krimp en vezeloriëntatie;
- nu is de uitvoering relatief eenvoudig uitgevoerd met stoktrilnaalden, maar een hoogfrequente triltafel heeft de voorkeur;
- er zijn geen problemen opgetreden met de voorspanning; in het verleden zijn schades gerapporteerd bij de combinatie van UHSB en voorspanning in verband met de aansluitingen tussen de verschillende onderdelen, waardoor spatten van de hoeken/vlakken optrad.

Tijdens het ter perse gaan van dit artikel was het de verwachting dat de eerste modulaire UHSB brug in september 2012 zou worden geplaatst in Rotterdam. ☒



● LITERATUUR

- | | |
|--|---|
| <p>1 Broek, B. van den, Berekeningswijze UHSB brug aan de Hoekersingel, 2011.</p> <p>2 Falbr, J., 3D modelling C170/200 bridge Hoekersingel Rotterdam, 2011.</p> <p>3 Broek, B. van den, Vries, T. de & Veen, C. van der, Modulaire bruggen in UHSB. <i>Cement</i> 2009/6.</p> | <p>4 Broek, B. van den, Modulaire autobrug in vezelversterkt ultra-hogesterkte beton, 2009.</p> <p>5 Vries, T. de, Modulaire brug in vezelversterkt hogesterkte beton, 2008.</p> <p>6 AFGC/SETRA, Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations, 2002.</p> |
|--|---|