



Alternatief voor voetgangers-, fietsers- en autobridgen

Modulaire bruggen in UHSB

Door de toenemende behoefte aan slanke en open constructies wordt er steeds meer gezocht naar alternatieve materiaaltoepassingen. Eén van de belangrijkste alternatieven op het gebied van betonconstructies is het toepassen van vezelversterkte hoge-, zeer hoge- of ultra-hogesterktebeton. Om op deze behoefte in te spelen heeft het FDN Engineering BV een concept ontwikkeld voor modulaire bruggen in vezelversterkt ultra-hogesterktebeton (UHSB). Er zijn twee aparte onderzoeken gedaan: een variant voor voetgangers en fietsers en een variant voor (auto)verkeer.

De voornaamste reden om een modulaire brug te ontwikkelen, is de steeds groter wordende vraag naar een vervanging voor de bestaande, veelal houten, voetgangers- en fietsersbruggen. De verwachting is dat met het hoogwaardige vezelversterkte beton zeer slanke constructies kunnen worden gemaakt, waarbij met het gunstige onderhoudsarme gedrag op langere termijn kostenbesparingen kunnen worden behaald.

Modulair houdt in dit geval in dat verscheidene geprefabriceerde standaard brucelementen (moten) in lengterichting aan elkaar kunnen worden gekoppeld tot de gewenste overspan-

ir. Bart van den Broek en ir. Tjibbe de Vries¹⁾

FDN Engineering BV, Amsterdam

dr.ir. Cor van der Veen

TU Delft, fac. CITG

ning. Het koppelen gebeurt met behulp van plakvoegen en voorspankabels. Een groot voordeel van het modulair bouwen is dat met één standaard element verschillende overspanningen kunnen worden gecreëerd. Tevens is het door het in lengterichting met elkaar verbinden van de elementen mogelijk de leuning constructief mee te laten werken. Deze worden daarom ook in één stuk met de dekconstructie meegegoten. Doordat ultra-hogesterktebeton (UHSB) wordt toegepast is er door de goede eigenschappen geen aparte slijtlaag op het brugdek meer vereist. Na het achter elkaar plaatsen en voorspannen van de moten is de brug dus al 'af' en zijn er geen extra handelingen meer nodig (zoals de leuningen plaatsen of een slijtlaag aanbrengen).

Onderzoek

Twee afstudeerders aan de TU Delft [1,2] hebben achtereenvolgens onderzoek gedaan naar de mogelijkheden voor en het ontwerp van een voetgangers- en fietsersvariant en een autovariant. De gehanteerde verkeersbelastingen zijn voor beide varianten conform de nieuwe norm NEN 6706, zoals omschreven in de ROBK 6 (Richtlijnen voor het Ontwerpen van Betonnen Kunstwerken). In beide gevallen is voor het ontwerp uitgegaan van een staalvezelversterkt beton B200 (C170/200). In dit beton is geen passieve wapening in de vorm van staven en netten aanwezig. De materiaaleigenschappen, sterktes en bijbehorende rekenwaarden zijn bepaald aan de hand van de Franse aanbeveling voor vezelversterkt UHSB. Door het huidige ontbreken van een nationale norm voor constructies in UHSB wordt deze aanbeveling geschikt geacht.

Varianten

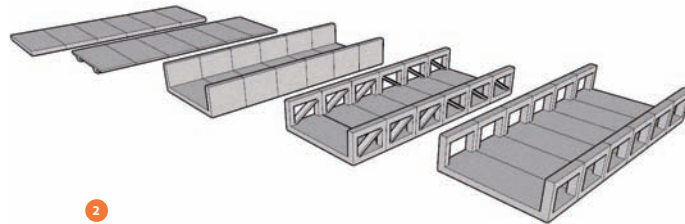
Het idee voor de modulaire brug is ontstaan als alternatief voor de huidige voetgangers- en fietsersbruggen. Het eerste onderzoek richtte zich hier dan ook op.

Voetgangers- en fietsersbruggen

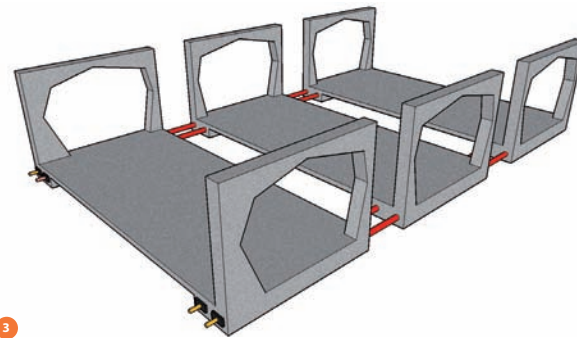
Verschillende varianten, waaronder een drietal plaatliggers, een vierendeelligger en een vakwerkligger zijn met elkaar vergeleken (fig. 2). De laatste twee varianten bleken het meest geschikt, omdat hierbij optimaal gebruik wordt gemaakt van de meewerkende leuningen. Dit is direct terug te zien in de kosten door een vermindering van het benodigde betonvolume en de benodigde voorspanning.

¹⁾ Dit artikel is gebaseerd op twee afstudeeronderzoeken verricht aan de TU Delft. Afgezien van de auteurs hadden prof.dr.ir. Joost Walraven (voorzitter, TU Delft), dr.ing. Arie Romeijn (TU Delft), ir. Lambert Houben (TU Delft) en ir. Dilshan Tirimanna (FDN Engineering BV) zitting in de afstudeercommissie.

- 1 Impressie van de mogelijkheden van modulaire bruggen van vezelversterkt ultra-hogesterktebeton
- 2 Verschillende onderzochte varianten van de modulaire brug
- 3 Principe modulaire fabricage



2

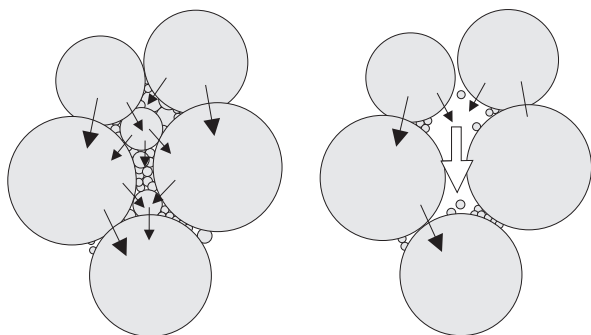


3

Tijdens het onderzoek is uitgegaan van een brug die voetgangers- en fietsersverkeer in twee richtingen kan huisvesten en ongeveer 10 m moet kunnen overspannen. Aan de hand hiervan is de interne breedte van de brug vastgesteld op 3,5 m en de mootlengte op 1,7 m. De overspanning is dus met zes moten te maken. Uit berekeningen met het eindige-elementenpakket ESA PT is gebleken dat in dit geval een dekdikte van 90 mm kan worden behaald. De leuning bestaat in dit geval uit staven van 150 x 150 mm en er zijn 4 voorspanstrengen met een totale voorspankracht van ongeveer 800 kN nodig.

Door het optimale gebruik van de meewerkende leuningen kan het dek zeer dun worden uitgevoerd. Er is echter een aantal verdikkingen in het dek noodzakelijk om de voorspanning te kunnen opnemen. Ter plaatse van de aansluiting leuning-dek zijn deze verdikkingen bovendien nodig in verband met de momenten die in de aansluiting kunnen ontstaan door voetgangersbelastingen op de leuning. Deze verdikkingen zijn gecombineerd door de voorspanning vlakbij de aansluiting leuning-dek aan te brengen (fig. 3).

Uiteindelijk is besloten de afmetingen van de brug aan te passen, zodat het product breder inzetbaar en het transport zo eenvoudig en efficiënt mogelijk wordt. De meeste voetgangers- en fietsersbruggen in Nederland overspannen gemiddeld 15 m. Op dit moment is de mootlengte vastgesteld op



4

3,0 meter, zodat met maximaal vijf moten overspanningen tot 15,0 m kunnen worden behaald. De benodigde dekdikte is in dit geval 100 mm.

Autobrug

In navolging hiervan wilde FDN Engineering BV (Functional Design Netherlands) het concept van de modulaire brug uitbreiden met het ontwerp van een modulaire autobrug. Het tweede onderzoek had als doel deze variant te onderzoeken. Er is geprobeerd de vormgeving zoveel mogelijk te laten aansluiten op die van de voetgangers- en fietsersbrug, zodat beiden als één nieuw product kunnen worden gepresenteerd. Via een globaal ontwerp en een voorontwerp is naar een detailontwerp toegewerkt.

In het globaal ontwerp is, om een eerste vorm van de brug te krijgen, een aantal optimale afmetingen voor de modulaire brug vastgesteld. Dit aan de hand van de geldende uitgangspunten en de randvoorwaarden die volgen uit de Wegenverkeerswet en het Handboek Wegontwerp. In het voorontwerp zijn vervolgens, aan de hand van berekeningen, de dekdikte, de benodigde hoeveelheid voorspanning, het te gebruiken voorspanstelsel en de afmetingen van de leuning vastgesteld. In het detailontwerp zou vervolgens de verdere detaillering van de brug worden uitgewerkt.

In het ontwerp is de leuning als constructief element in de krachtsverdeling meegenomen. Hierdoor kon het brugdek zeer slank en met minimale hoeveelheid voorspanwapening worden uitgevoerd. Echter, indien de brugleuning zou worden beschadigd door een aanrijding zou dit kunnen leiden tot instorten van de brug. Er zijn drie mogelijkheden om dit instorten te voorkomen:

- voorkomen dat de leuning wordt aangereiden met een geleide constructie;
- leuning zeer zwaar uitvoeren om aanrijding te doorstaan;
- brug dimensioneren zonder de leuning tot de hoofdconstructie te rekenen.

In verband met het beoogde open en slanke karakter van de brug waren geleiderailconstructies aanvankelijk ongewenst. Toch is ervoor gekozen, afwijkend van de uitgangspunten, geleiderailconstructies toe te passen (optie a). Hierdoor is de

brug een stuk breder geworden dan in het begin was aangenomen. Maar de leuning kan slank worden uitgevoerd volgens dezelfde ontwerpvoorwaarden als bij de voetgangers- en fietsersbrug.

Tijdens het onderzoek is uitgegaan van een autobrug die autoverkeer in twee richtingen kan huisvesten en ongeveer 18 m moet kunnen overspannen. Aan de hand hiervan is de interne breedte van de brug vastgesteld op 9,7 m (inclusief geleiderailconstructies) en de mootlengte op 3,0 m. De overspanning is dus met zes moten te maken. Ook hier is gebruikgemaakt van het eindige-elementen pakket ESA. De benodigde dekdikte is in dit geval 175 mm.

Dankzij de grotere dekdikte zijn de verdikkingen in het dek bij de aansluiting leuning-dek in dit geval niet nodig. De verdikkingen voor het huisvesten van de voorspanning zijn echter groter en meer naar het midden van de doorsnede verschoven.

Beide varianten zijn te realiseren met een kostprijs van € 2000,- per vierkante meter brugdek.

Materiaal

Het B200 beton dankt zijn goede eigenschappen aan zijn mengsamenstelling. Het betonmengsel wordt zo homogeen mogelijk gemaakt door de maximale grootte van de toeslagkorrel klein te houden, omdat grote korrels voor grote spanningsconcentraties zorgen. Conventionele betonmengsels hebben een maximale diameter van de toeslagkorrel (D_m) van ongeveer 32 mm; voor het B200 betonmengsel ligt dit rond de 1 mm. De pakkingsdichtheid van de toeslagkorrels en de fillers wordt zo groot mogelijk gemaakt door het toepassen van een discontinue zeefkromme, om het korrelpakket maximaal te kunnen benutten (fig. 4).

Na hydratatie moet geen vrij water overblijven. Dit water leidt immers tot poriën en zoekt bovendien een uitweg naar buiten, waardoor interne spanningen in het beton ontstaan. Het is beter om ervoor te zorgen dat er na hydratatie cement overblijft, omdat deze cementkorrels nog als fillers kunnen dienen. Conventionele betonmengsels hebben een water-cementfactor van ongeveer 0,4. Voor het B200 mengsel ligt dit rond de 0,2 of lager. Een nadeel hiervan is echter dat er strengere eisen moeten worden gesteld aan de exacte waarde van de water-cementfactor, omdat het variatiegebied van de druksterkte bij deze lage waarden veel groter is.

De microstructuur van het beton kan worden verbeterd door de verharding van het beton onder bepaalde omstandigheden te laten plaatsvinden, bijvoorbeeld bij een verhoogde temperatuur of onder druk.

Omdat een verhoging van de sterkte van het beton tot een brosser gedrag leidt, moeten vezels worden toegevoegd om te zorgen voor voldoende ductiliteit (taaiheid/nascheursterkte). Echter, door de lage water-cementfactor en de aanwezige vezels wordt het mengsel slechter verwerkbaar. Hierdoor is het nodig om superplastificeerders te gebruiken om het beton zelfverdichtend te maken.

Het materiaal is door de lage permeabiliteit zeer goed bestand tegen indringing van schadelijke stoffen zoals chloriden en doozouten. Hierdoor is het materiaal zeer duurzaam en vrijwel onderhoudsvrij. Tevens is er door de hogere sterkte voor dezelfde toepassing veel minder materiaal nodig (een factor 5 á 6), wat een besparing van grondstoffen oplevert en voor een lagere CO₂-uitstoot zorgt.

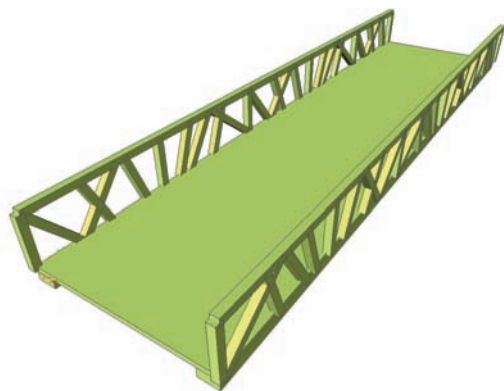
Berekening

Bij beide onderzoeken zijn alle doorsnede-berekeningen gemaakt met het programma ESA (fig. 5). Vervolgens is de uitvoer gecontroleerd aan de hand van handberekeningen. De materiaaleigenschappen, sterktes en bijbehorende rekenwaarden zijn bepaald aan de hand van de Franse aanbeveling voor vezelversterkt UHSB [3].

De rekenwaardes van de druk- en (buig)treksterktes worden in de Franse aanbeveling ongeveer op dezelfde manier bepaald als in de NEN-normen en Eurocodes, echter er wordt voor de materiaalfactor 1,3 aangehouden.

De hogere sterkte van het beton zorgt hier logischerwijs voor hogere waarden. Bij de bepaling van de afschuifsterkte wordt in de aanbeveling echter duidelijk rekening gehouden met de aanwezigheid van de vezels. Deze dragen actief bij aan de schuifsterkte. De schuifsterkte wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$\tau_{Rb} = \frac{V_u}{b_0 \cdot d} \quad [\text{N/mm}^2]$$



5

- 4 Interne krachtsafdracht van beton bij dichte en bij open pakking
- 5 Ingevoerd eindige-elementenmodel van de modulaire brug.

Hierin is de uiterst opneembare dwarskracht gelijk aan:

$$V_u = V_{Rb} + V_a + V_f \quad [\text{N}]$$

V_{Rb} is het aandeel van het beton, V_f het aandeel van de vezels en V_a het aandeel van de aanwezige wapening. Het wapeningsaandeel is bij de afwezigheid van passieve wapening in de vorm van staven en netten gelijk aan nul. Het beton- en vezelaandeel wordt bepaald volgens:

$$V_{Rb} = \frac{1}{\gamma_E} \cdot \frac{0,21}{\gamma_b} \sqrt{f_{cj}} \cdot b_0 \cdot z \quad [\text{N}]$$

$$\tau_{Rb} = \frac{V_{Rb}}{b_0 \cdot d} = \frac{1}{\gamma_E} \cdot \frac{0,21}{\gamma_b} \cdot \sqrt{f_{cj}} \cdot 0,9 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$V_f = \frac{b_0 \cdot z \cdot \sigma_p}{\gamma_{bf} \cdot \tan \beta_u} \quad [\text{N}]$$

$$\tau_f = \frac{V_f}{b_0 \cdot d} = \frac{0,9 \cdot \sigma_p}{\gamma_{bf} \cdot \tan \beta_u} \quad [\text{N/mm}^2]$$

met:

b_0 = de breedte van de betondoorsnede

d = de hoogte van de betondoorsnede

$\gamma_E \cdot \gamma_b$ = een veiligheidsfactor met een waarde van 1,5. Deze factor wordt toegepast voor de onzekerheid die ontstaat door de extrapolatie van formules voor hogeresterktebeton

f_{cj} = is de karakteristieke kubusdruksterkte van het beton

z = is de geschatte hoogte waarover de vezels effectief meewerken

σ_p = de resttreksterkte van de doorsnede

γ_{bf} = een veiligheidsfactor met een waarde van 1,3

β_u = de hoek van de drukdiagonalen. De minimale waarde van 30° wordt voorgeschreven

Een Japanse aanbeveling beschrijft ongeveer dezelfde benadering voor de schuifsterkte. Deze aanbeveling neemt echter als extra factor nog de meewerking van de eventueel aanwezige voorspanning mee. Deze waarde is afhankelijk van de hoek die de voorspankabels maken met de lengtes van de brug. Vanwege het modulaire karakter van de brug kan de voorspanning alleen lineair worden aangebracht. Een parabolisch verloop zou immers meerdere verschillende elementen vereisen. Het aandeel in de belastingreductie van de voorspanning is daardoor gelijk aan nul.

In het geval van de modulaire brug is volgens zowel de Franse als de Japanse methode het aandeel van de vezels meer dan vier keer groter dan het aandeel van het beton. De schuifsterkte van

- 6 'Bosse'-ontwerp
7 'Bionic'-ontwerp

LITERATUUR

- 1 Vries, T. de, 'Modulaire brug in vezelversterkt hogesterktebeton', 2008
- 2 Broek, B. van den, 'Modulaire autobrug in vezelversterkt ultra-hogesterktebeton', 2009
- 3 AFGC / SETRA, 'Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Interim Recommendations', 2002



6



7

het UHSB is dus vijf keer groter dan dat van een conventioneel beton. Hiermee is ook de grootste winst te behalen in het ontwerp van de brug. De optredende momenten in lengterichting van de brug worden 'opgenomen' door de voorspanning, de optredende momenten in de dwarsrichting moeten echter worden opgenomen door het brugdek zelf. Door de grotere schuifsterkte in combinatie met een grotere buigtreksterkte is dus de enorme winst op de dekkdikte te behalen. Uiteindelijk is met de waarden gerekend uit tabel 1.

Tabel 1 Eigenschappen van het beschouwde ultra-hogesterktebeton

eigenschap	waarde	rekenwaarde	eenheid
gewicht	2500	2500	kg/m ³
druksterkte	200	110	N/mm ²
buigtreksterkte	45	15	N/mm ²
treksterkte	10	5	N/mm ²
schuifsterkte	-	8	N/mm ²
elasticiteitsmodulus	-	60 000	N/mm ²

Na de ontwerpberoeeningen zijn nog enkele detailberekeningen toegepast, onder meer:

- de brug is getoetst op maatgevende belastingcombinaties met wind-, sneeuw- en temperatuursinvloeden;
- de voorspanverliezen zijn bepaald, rekening houdend met krimp- en kruipeffecten;

- ter plaatse van de voorspanankers is er, met betrekking tot de inleiding van de voorspankrachten, getoetst op splijtkrachten;
- de maatgevende voegen zijn getoetst op afschuiving en een garantie van de duurzaamheid;
- er is een dynamische analyse, met betrekking tot het trilde drag, gemaakt van de brug als geheel.

Ontwerp

Voor de modulaire bruggen is een aantal ontwerpen gemaakt door de architect Chris Bosse, onder andere bekend door zijn ontwerp van het Olympisch zwembad 'The Watercube' in Peking.

Twee van deze ontwerpen genaamd de 'Bosse Bridge' en de 'Bionic Bridge', benadrukken de mogelijkheden van het gebruik van UHSB, elk op eigen wijze.

Bij de Bosse Bridge zijn de leuningen slanke vakwerkconstructies en hierdoor werken zij zeer goed mee in de krachtsafdracht. Hierdoor is het ontwerp uiterst open en slank (fig. 6). Bij de Bionic Bridge zijn de leuningen wat zwaarder uitgevoerd. Dit is nodig omdat zij door hun kronkelende verloop minder gunstig meewerken in de krachtsafdracht. Het ontwerp is echter bijzonder door de futuristische vormgeving (fig. 7). Het plan is om de brug uiteindelijk in beide uitvoeringen leverbaar te maken.

Ten slotte

Het gebruik van UHSB en de bijbehorende voordelen komen meer tot hun recht bij toepassing van de voetgangers- en fietsersbrug dan bij de autobrug. In het laatste geval worden, door de combinatie van de zware verkeersbelastingen volgens de nieuwe norm en het gebruik van lineair georiënteerde voorspanning, de afmetingen van het brugdek alsnog erg groot. Een oplossing voor dit probleem is het gebruik van kokerliggers in UHSB. In dat geval kunnen enorme besparingen op de betonvolumes worden behaald. Echter, dit is vanaf de buitenkant niet waarneembaar en de mogelijkheden van het gebruik van UHSB met betrekking tot openheid en slankheid zijn daarvoor niet merkbaar.

FDN Engineering BV is momenteel bezig met een pilotproject voor de modulaire voetgangers- en fietsersbrug. Een aantal detailcontroles wordt nog uitgevoerd, waaronder het controleren van het niet-lineaire gedrag van de meewerkende leuningen met betrekking tot knik en plooi. De bruggen kunnen volledig Design&Construct worden geleverd. ☒