

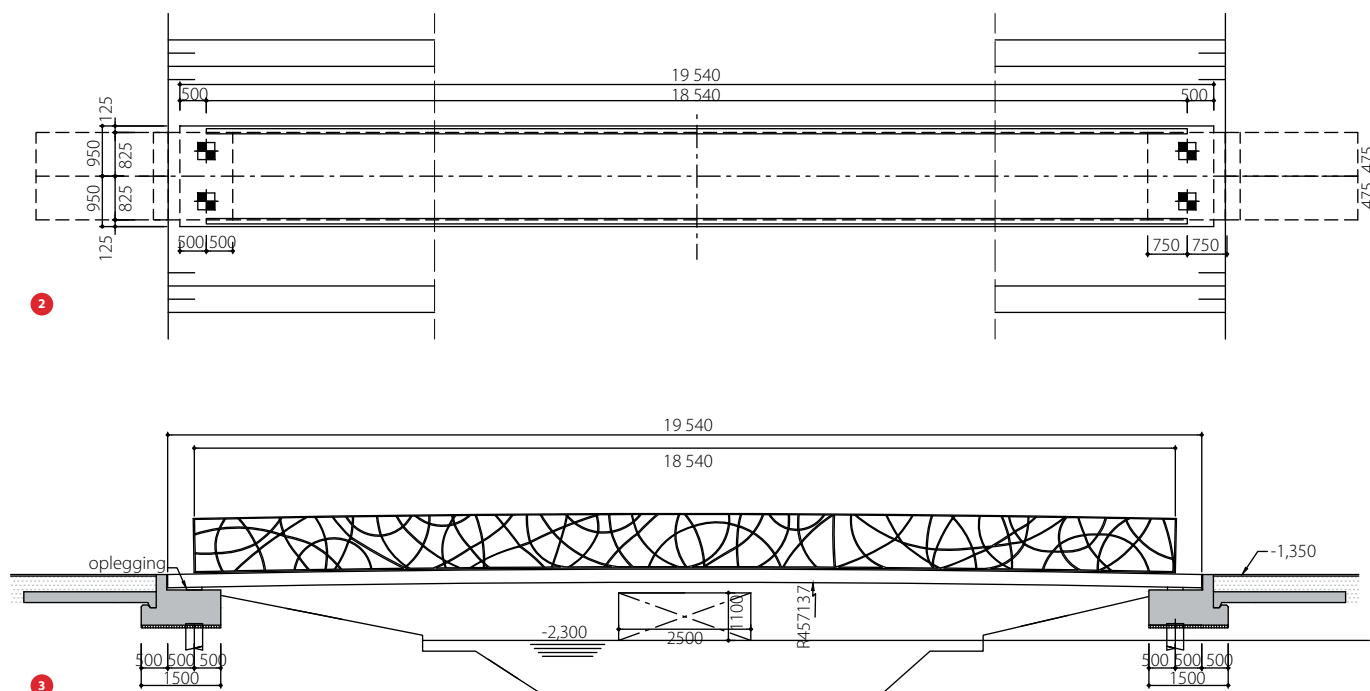


Afstudeerstudie naar het ontwerpen en berekenen van een voorgespannen parkbrug van ultra-hogesterktebeton

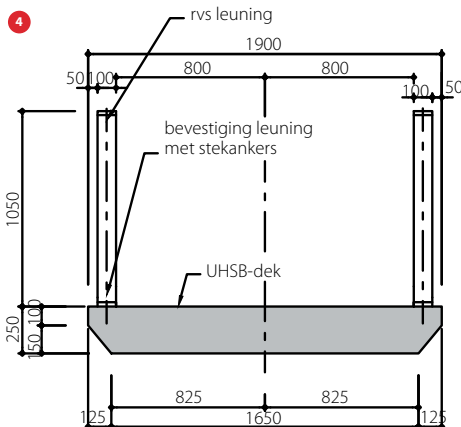
UHSB als alternatief voor hout

Gemeente Rotterdam is op grote schaal bezig met het vervangen van bestaande – veelal houten – parkbruggen. Deze bruggen zijn aan het einde van hun ontwerplevensduur en worden vervangen door een lichte variant met weinig onderhoud en een lange levensduur. Hierbij wordt gestreefd naar het

behoud van de huidige fundering. Een materiaal dat hier zeer geschikt voor zou kunnen zijn, is ultra-hogesterktebeton (UHSB). In een afstudeeropdracht is de haalbaarheid van een zo slank mogelijke voorgespannen parkbrug met UHSB onderzocht.



Gemeente Rotterdam heeft recentelijk de Exercitiebrug (foto 1), een bestaande houten parkbrug, vervangen door een composieten variant. UHSB vormt een goede tegenhanger van dit vezelversterkte kunststof, aangezien de kosten en duurzaamheid in grote mate overeenkomen. Daarom is ervoor gekozen deze brug als uitgangspunt te nemen voor de afstudeerstudie. Voor de overspanning ($L = 18,54$ m), de breedte ($b = 1,9$ m) en ook de dikte van het brugdek ($h = 0,25$ m) zijn dezelfde afmetingen aangehouden als die van de bestaande composietbrug. Belangrijke verschillen zijn dat de UHSB-brug wordt uitgevoerd als vlakke plaatbrug (fig. 2, 3, 4). Dit in tegenstelling tot de composietbrug die met een lichte toog is gerealiseerd. Bovendien hoeft er geen inklemming bij de landhoofden te worden gecreëerd ten behoeve van het dynamisch comfort. Het voordeel van het vrij opgelegde systeem is dat er in plaats van met vier, met twee palen kan worden volstaan (per landhoofd). Verder is een slijtlaag niet nodig omdat het betondek van een antislipreliëf kan worden voorzien.

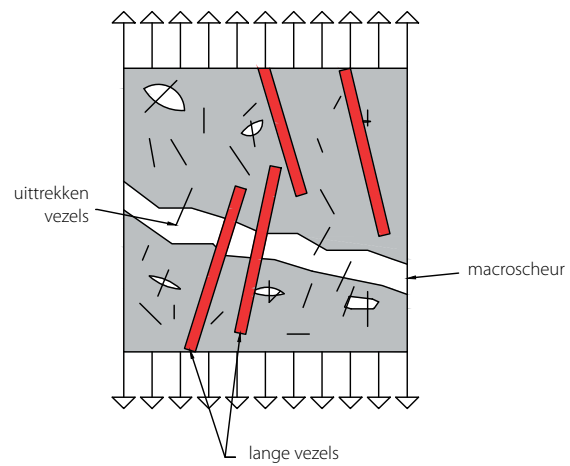
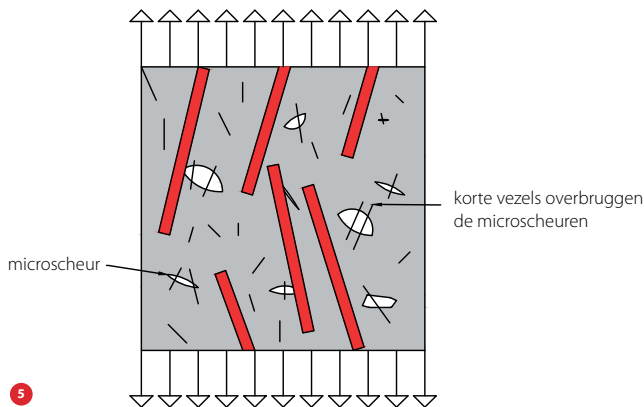


Materiaaleigenschappen UHSB

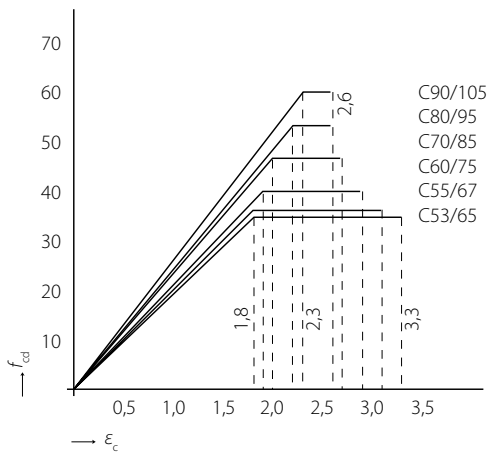
UHSB heeft een zeer hoge druksterkte (150-200 MPa) en kan ook (in beperkte mate) trekkrachten opnemen. Dit komt door de staalvezels met verschillende lengte die in het betonmengsel zijn opgenomen. Na het scheuren van de cementmatrix worden deze vezels actief. Dit wordt verstevigingsgedrag genoemd. De mate waarin dit optreedt, hangt af van de samenstelling van het materiaal. Hierbij zorgen de korte vezels voor het overbruggen van de microscheuren, wat een gunstig effect heeft op het scheurpatroon van de doorsnede. De lange vezels overbruggen de macroscheuren, waardoor de buigsterkte toeneemt (fig. 5).

¹⁾ Lisa van Geffen is met de studie 'Een fiets- en voetgangersbrug van UHSB in combinatie met voorspanning' afgestudeerd aan de Haagse Hogeschool, opleiding Civiele Techniek. Zij heeft de studie verricht bij de gemeente Rotterdam, onder begeleiding van M. Attahiri en E. Oostveen.

- 5 Korte vezels versus lange vezels
- 6 Spanning-rekdiagram voor hogesterktebeton (drukgebied)
- 7 Spanning-rekdiagram UHSB [1]
- 8 Schematisatie één-massa-veersysteem



5



6

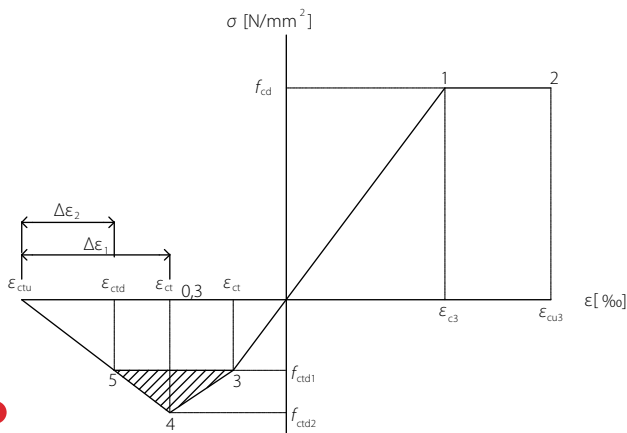
Naast de treksterkte heeft UHSB een aantal andere bijzondere kenmerken.

Vezeloriëntatie

Een belangrijk begrip waarmee rekening moet worden gehouden is de vezeloriëntatie. Het is immers het beste als de vezels loodrecht op de scheuren liggen. Maar het is lastig te controleren hoe de vezels daadwerkelijk in de doorsnede komen te zitten. Daarom wordt in de Franse aanbevelingen (zie gelijknamige kop in artikel) de K-factor geïntroduceerd, die deze onzekerheid in rekening brengt.

Post-peakgedrag

Bij UHSB moet rekening worden gehouden met het zogenoemde post-peakgedrag. Dit gedrag is kenmerkend voor hogere betonsterkteklassen en wil zeggen dat bij het stuiken van het beton de rek nog iets toeneemt bij een sterke teruggang van de opneembare drukspanning. Daarom worden er begrenzings gesteld aan de rek bij plastische vervorming en de rek bij betonstuik. Volgens NEN-EN 1992-1 moet voor hogesterktebeton een variërend spanning-rekdiagram worden aangehouden (fig. 6).



7

Autogene krimp

Een volgend belangrijk verschijnsel bij UHSB is de autogene krimp, die aanzienlijk hoger is dan voor normaal beton. Autogene krimp is een bijzondere vorm van verhardingskrimp, die optreedt bij betonsoorten met een lage water-bindmiddelfactor en een hoog percentage aan fijne stoffen. Deze krimp wordt veroorzaakt doordat, bij het verdergaande hydratatieproces, water wordt onttrokken uit de poriën door het cement dat nog niet volledig heeft gereageerd met water. Hierdoor ontstaat een onderdruk in deze poriën waardoor deze samentrekken en het beton fysiek verkort.

Zelfhelend

Een andere belangrijke eigenschap van UHSB is dat het beton zelfhelend is. Dit houdt in dat de aanwezige cementkorrels, die nog niet zijn verhard, reageren met water, dat bij scheurvorming het beton kan binnendringen. Door deze verdergaande cementhydratatie wordt de scheur weer opgevuld. Ook vormen zich calciumcarbonaatkristallen (CaCO_3) in de scheuren, die mede bijdragen aan de opvulling van de scheur. Deze manier van zelfheling zorgt voor het herstellen van kleine scheuren tot $50 \mu\text{m}$.

Zelfverdichtend

Als laatste eigenschap wordt genoemd dat UHSB zelfverdichtend is.

Fransse aanbevelingen

Momenteel zijn er nog geen nationale normen of Eurocodes beschikbaar voor het rekenen aan UHSB. In Frankrijk heeft men veel meer ervaring met het rekenen aan constructies van UHSB. Hiervoor is een richtlijn opgesteld, die ook wel in Nederland wordt gebruikt (AFGC/SETRA [1]).

De eerste richtlijn uit 2002 was gebaseerd op de Franse norm (BPEL). Sinds juni 2013 is er een revisie gemaakt op deze richtlijn, die aansluit op Eurocode 2. Deze richtlijnen gelden voor beton met een druksterkte tussen 150 MPa en 250 MPa. Tijdens deze afstudeerstudie is dan ook gebruikgemaakt van deze aanbevelingen.

Spanning-rekdiagram

In de Franse aanbevelingen wordt het spanning-rekdiagram gebruikt als in figuur 7, met waarden uit tabel 1. Het drukgebied bestaat uit een elastische fase (tot punt 1) en een plastische fase (tussen punt 1 en punt 2).

Het trekgebied voor een low-strain hardening materiaal (een

Tabel 1 Materiaaleigenschappen; karakteristieke druksterkte en treksterkte zijn ontleend aan [2]. De andere waarden zijn berekend met [1].

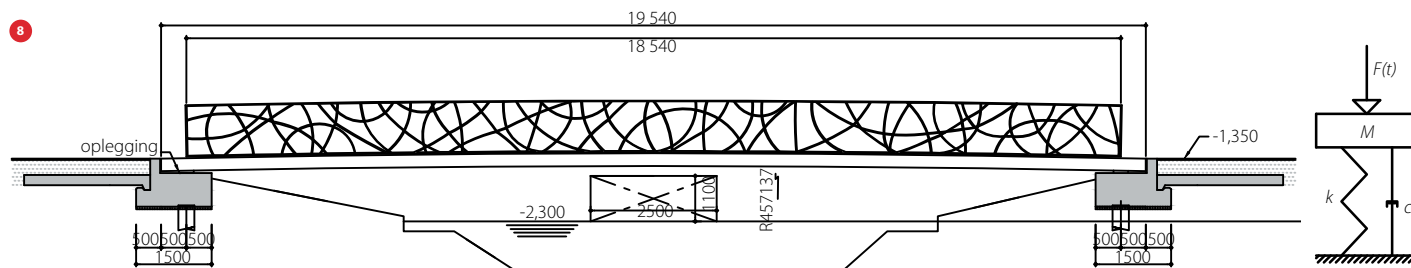
drukgebied		spanning $[\text{N}/\text{mm}^2]$		rek [-]	
nr. traject		symbool	waarde	symbool	waarde
1	plastische vervorming beton	f_{ctd}	96,333	ϵ_{c3}	2,3 ‰
2	grenswaarde betonstuik	f_{ctd}	96,333	ϵ_{ct3}	2,6 ‰
trekgebied					
3	ontstaan 1e scheur	f_{ctd1}	6,154	ϵ_{ct}	0,1469 ‰
4	scheurwijdte = 0,30 mm	f_{ctd2}	7,385	$\epsilon_{ct0,3}$	1,947 ‰
5	bezwijken vezels bij aangenomen maximale trekspanning	f_{ctd1}	6,154	ϵ_{ctd}	4,872 ‰
6	grenswaarde bezwijken op trek	f_{ctu}	0	ϵ_{ctu}	19,5 ‰

materiaal waarbij in beperkte mate verstervigingsgedrag optreedt en na het ontstaan van scheuren de treksterkte iets toeneemt) bestaat uit drie delen. Allereerst de elastische fase (tot punt 3, vóór scheurvorming). Vanaf punt 3 begint het beton te scheuren, de vezels worden actief en er vindt in beperkte mate verstervigingsgedrag plaats. Vanaf punt 4 beginnen de vezels langzaam te bezwijken. Omdat over het algemeen vezels worden toegepast van een hoogwaardige staalkwaliteit zal de maximale treksterkte ervan overigens niet afhangen van het breken van de vezels, maar van een gebrek aan binding (aanhechting) aan het beton.

In het diagram wordt het gearceerde gedeelte verwaarloosd. Dit is een conservatieve aanname. Het oppervlakte van het gearceerde gedeelte is ten opzichte van het geheel zeer klein [2].

Variantenstudie

In het afstudeeronderzoek is een variantenstudie uitgevoerd met vier varianten. De verschillen bestonden uit een verschil in



de oplegging (vrij opgelegd – tweezijdig ingeklemd) en een verschil in het voorspanstelsysteem (voorgerekt staal – nagerekt staal). De keuze is gemaakt aan de hand van de berekeningen met betrekking tot het dynamisch comfort en de benodigde hoeveelheid voorspanning. Zo kon de haalbaarheid worden getoetst.

Dynamisch comfort

Een belangrijk verschijnsel bij de zeer slanke betonnen parkbrug is het trillingsgedrag. Door de constructie steeds slanker te maken, neemt de eigenfrequentie van de constructie af. Indien de eigenfrequentie van de brug samenvalt met het frequentiegebied van de mensen die op de brug lopen, treedt resonantie op. De eigenfrequentie van de constructie wordt berekend met:

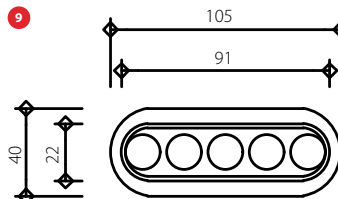
$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot k \cdot \sqrt{\frac{EI}{ML^4}}$$

Waarin:

- f = eigenfrequentie van het systeem [Hz]
- k = waarde afhankelijk van de opleggingen [-]
- E = elasticiteitsmodulus beton [N/m²] (volgens [2])
- I = oppervlaktetraagheidsmoment doorsnede [mm⁴]
- M = gelijkmatig verdeelde belasting permanente belasting [kg/m]
- L = overspanning [m]

Trillingsgedrag in verticale richting

Voor het berekenen van het trillingsgedrag in verticale richting wordt in de Eurocode verwezen naar de EUR 23984 – Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations. Als de berekende eigenfrequentie binnen het kritische gebied valt, moet worden gecontroleerd of de optredende versnelling van het brugdek onder de gestelde waarde blijft. Deze controle bleek noodzakelijk. In EUR 23984 worden drie methoden



genoemd om dit trillingsgedrag te kunnen beschrijven. Een daarvan is de Single Degree Of Freedom Method (SDOFM). Deze is in dit onderzoek gebruikt.

Bij deze methode wordt de brug geschematiseerd als een één-massa-veer-systeem (fig. 8). De massa van het brugdek wordt aangenomen als een geconcentreerde massa (modale massa [kg]). De aanwezige belastingen worden omgerekend naar een puntlast ($F(t)$ [N]). Het trillingsgedrag van de constructie onder invloed van de aanwezige belasting wordt beschreven met behulp van de veerstijfheid k [N/m]. Daarnaast wordt door middel van de dempingsverhouding (c [-]) rekening gehouden met het uitdempen van de trilling. De dempingsverhouding is afhankelijk van het constructiemateriaal.

De SDOFM-methode houdt rekening met de stapfrequentie van zowel voetgangers als joggers. Op basis van de resultaten in tabel 2 is gekozen voor de vrij opgelegde variant.

Voorspanning

De voorspanning kan zowel met voorgerekt als met nagerekt staal worden uitgevoerd. De voorspanning is voor alle varianten berekend in de BGT. De resultaten voor de voorspanning bij de vier varianten zijn weergegeven in tabel 3. Op basis van deze gegevens en het feit dat de productiekosten hoger zijn bij voorgerekt staal (i.v.m. een kostbare mal), is gekozen voor voorspanning met nagerekt staal.

Uitwerking voorspanning en verankering

De voorspanstrengen die worden toegepast, hebben een diameter van 15,7 mm en een karakteristieke treksterkte van 1860 N/mm². In totaal zijn er uiteindelijk 30 strengen benodigd (in VO-fase waren dat er nog 33, zie tabel 3), verdeeld over 6 kanalen. In het beton zijn plastic, ovale omhullingsbuizen opgenomen (fig. 9). Aangezien de constructiehoogte gering is, wordt op deze manier een zo groot mogelijke excentriciteit bereikt. Dit heeft een gunstig effect op het belastingsaandeel van de voorspanning. Hierdoor kan een minimaal aantal strengen worden toegepast.

Het type verankering dat wordt toegepast, is een SD-plaatanker (Dywidag, fig. 10). Dit anker is zeer geschikt voor vlakke platen en zorgt voor een goede spreiding van de voorspankracht over

Tabel 2 Resultaten comfortberekening

	eigenfrequentie [Hz]	$a_{\text{max,voetgangers}}$ [m/s ²]	$a_{\text{max,joggers}}$ [m/s ²]	$a_{\text{toelaatbaar}}$ [m/s ²]
tweezijdig ingeklemd	3,066	0,487	9,002	0,7
vrij opgelegd	1,351	0,671	0 *	0,7

* De berekende eigenfrequentie valt buiten het kritische frequentiegebied van de joggers. Er treedt dus geen resonantie op.

Tabel 3 Resultaten berekening benodigde voorspanning

	vrij opgelegd voorgerekt staal	vrij opgelegd nagerekt staal	ingeklemd voorgerekt staal	ingeklemd nagerekt staal
aantal strengen (stuk)	45	33	35	24



10

het betonoppervlak. Hierdoor is geen spiraalwapening rondom het anker noodzakelijk. Een bijkomend voordeel is dat verdere spreiding van de voorspankracht in het beton relatief beperkt blijft, zodat de splijtspanningen ook relatief klein zullen zijn. Normaal gesproken wordt de Europese Technische Goedkeuring (ETA) over het ankersysteem gebruikt bij het ontwerpen van de verankeringszone. Het SD-plaatanker is een voorbeeld van een kleine verankeringszone (weinig strengen; wordt meestal gebruikt bij dwarsvoorspanning in grotere constructies). Grotere verankeringsystemen zijn wel beproefd bij verschillende betondruksterkten, maar voor kleinere verankerings-elementen geldt dit niet. Het is niet rendabel het systeem bij meerdere betondruksterkten te laten testen. In de ETA wordt uitgegaan van een cilinderdruksterkte van 24 N/mm². Deze tabel is dus niet bruikbaar bij het ontwerpen van de verankeringszone bij UHSB. Daarom is er onder andere met behulp van de Franse aanbevelingen en de Eurocode een aantal onderbouwende berekeningen gemaakt voor de benodigde wapening ten behoeve van de optredende spanningen in de verankeringszone. Verder is er gekeken naar de optredende splijtspanning in breedterichting door het excentrisch aangrijpen van de voorspankracht. Spreiding in hoogterichting is gering vanwege de geringe constructiehoogte en het is dan ook niet noodzakelijk hier splijtwapening voor op te nemen.

Toetsen in de UGT

De gekozen variant (vrij opgelegd en voorspanning met nage-rekt staal) is getoetst op zowel de UGT als de BGT. Voor het berekenen van de betondrukzonehoogte x_u (UGT) is gebruikgemaakt van de spanning-rekdiagrammen van het UHSB

(zoals eerder beschreven), wapeningsstaal en voorspanstaal. Uiteindelijk resulteert dit in het diagram uit figuur 12 [2]. De grootte van de krachten in het beton worden verkregen door de oppervlakten in het spanningsdiagram. De grootte van de krachten in het staal worden verkregen door de optredende spanning te bepalen (aan de hand van de optredende rekken) en de toegepaste hoeveelheid staal. Alle afstanden in het diagram worden gerelateerd aan de betondrukzonehoogte x_u , zodat er uiteindelijk een vergelijking ontstaat met één onbekende. Met behulp van de evenwichtsvergelijking wordt x_u berekend, volgens:

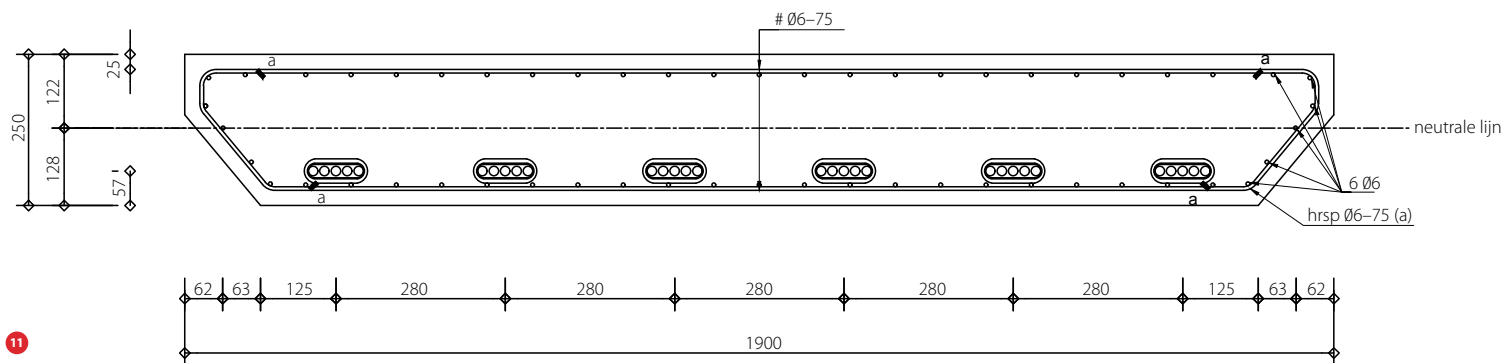
$$N_c + N'_s - N_T - N_s - P_w - \Delta N_p = 0$$

Waarin:

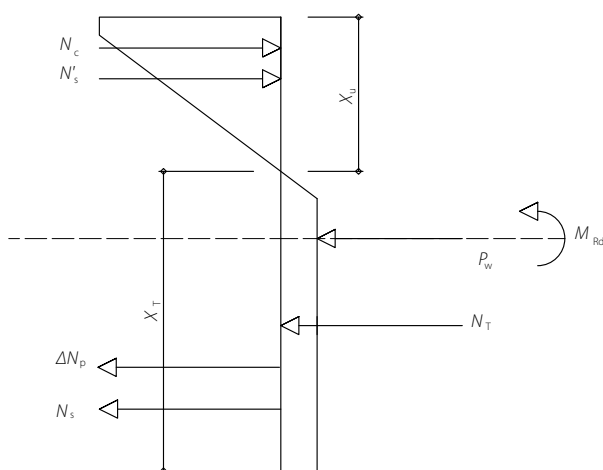
- N_c = drukkracht in het beton [N]
- N'_s = drukkracht in het wapeningsstaal [N]
- N_T = trekkracht in het beton [N]
- N_s = drukkracht in het wapeningsstaal [N]
- P_w = werkvoorspankracht [N]
- ΔN_p = kracht in het voorspanstaal [N]

Vervolgens wordt met de evenwichtsvergelijking M_{rd} bepaald. Hieruit volgde een unity check van 0,59, waarmee de constructie dus ruim voldeed.

Ook de dwarskrachtweerstand en de weerstand tegen vandalis-mebelasting is berekend. Hierop wordt in dit artikel verder niet nader ingegaan.



11



12

Toetsen in de BGT

De bruikbaarheidsgrenstoestand is de toestand met betrekking tot scheurvorming en doorbuiging. Allereerst is het scheurmoment van de gekozen variant bepaald. Het scheurmoment voor een voorgespannen doorsnede bestaat uit de gemiddelde treksterkte van het beton en de rekenwaarde van een eventueel aanwezige normaalkracht (in dit geval de werkvoorspanning). Het scheurmoment wordt dan berekend met:

$$M_r = (f_{ctm} - \sigma_{pm}) \cdot W$$

Waarin:

f_{ctm} = gemiddelde treksterkte van het beton [N/mm²]

σ_{pm} = P_w / A_c = werkvoorspanning [N/mm²]

W = weerstandsmoment [mm³]

Deze formule is alleen van toepassing op voorgespannen, statisch bepaalde constructies.

Indien het maximaal optredende moment in de BGT het scheurmoment zou overschrijden, zou een scheurwijdte toets moeten worden uitgevoerd. De doorsnede bleek echter niet gescheurd en een toets op scheurvorming was niet noodzakelijk.

Verder is de doorbuiging van de constructie berekend. Bij het ontwerp van de fundering voor de brug dient hiermee rekening te worden gehouden, zodat het profiel van vrije ruimte onder de brug altijd voldoet aan het programma van eisen. Ook hierop wordt in dit artikel niet nader ingegaan.

Conclusie en aanbevelingen

Het ontwerp voor een slanke fiets- en voetgangersbrug van UHSB (vrij opgelegde variant en voorspanning met nagerekt staal) is in theorie mogelijk. De volgende stap is het opstarten van een pilotproject vanuit de gemeente Rotterdam. Voor het ontwerp van de onderbouw moet worden onderzocht of het paal draagvermogen toereikend is en de huidige fundering kan worden hergebruikt (indien de palen niet zijn aangetast). Ook kan er worden onderzocht of een fundering op staal een optie is, gezien de geringe reactiekrachten vanuit de brug. ☒

LITERATUUR

- 1 Bétons fibres à ultra-hautes performances - Recommandations, Association Française de Génie Civil (AFGC), 2013.
- 2 Ketel, H., Willemse, R., Rijen, P. van, Koolen, E., Rekenmodel VVUHSB. Cement 2011/3.
- 3 Braam, C.R., Constructieel voorgespannen beton. Aeneas Media bv, 2012.
- 4 Geffen, L. van, Een fiets- en voetgangersbrug van wUHSB in combinatie met voorspanning, 2016.