



Gevoelig voor tweede-orde effect

Een netwerkboogbrug is efficiënt, in materiaalgebruik, maar heeft als nadeel dat een lichtgewicht dek geen optie is. Het dekgewicht heeft een directe relatie met de boogdimensies. Het gewicht heeft dus (ook) invloed op de toetsing op sterkte en stabiliteit van de boog. Met de Eurocode in de hand worden een flink aantal verbeteringen op de stabiliteit van de boog aangebracht. En het besparen op materiaal vraagt meer rekenwerk dan doorgaans aangenomen, voor het bouwen en inrijden is er weinig materiaalreserve beschikbaar.

ing. M.Th.M. Somers PMSE RC en ing. L.M. Hendriks MSEng BA

Marcel Somers en Lei Hendriks zijn constructeurs bij Wagemaker in Rosmalen.

De basis voor het constructief ontwerp is het referentieontwerp van de architect en een aantal harde randvoorwaarden. Om voor de toekomst maximale ruimte te maken voor een vrij indeelbare rijksweg is gekozen voor een enkele overspanning, zonder tussensteunpunten. De hoofdoverspanning volgt dus direct uit de breedte van de Rijksweg A2 en N2 met op- en afritten.

Er is gekozen voor een netwerkboogbrug. Het betreft een stalen fietsbrug waardoor de minimale benodigde vrije ruimte boven de Rijksweg maar liefst 7 m bedraagt. En in verband met het nabijgelegen vliegveld Eindhoven is ook de hoogte van de boogtop begrensd op 48,50 m +N.A.P. De basisuitgangspunten zijn helder.

Door te kiezen voor een oplossing zonder aanbruggen maar het vast verbinden van de eindvelden aan de brug, is een voegloze oplossing gecreëerd. Hiermee is invulling gegeven aan de wens van gemeente Eindhoven om een onderhoudsarme brug te ontwerpen.

Constructief Ontwerp

Gegevens:

- totale lengte van de brug: 160,5 m;
- hoofdoverspanning: 131,5 m;
- breedte: 6,1-9 m;
- breedte fietspad: 4,5-6,7 m.

Voor het constructief ontwerp is het bepalen van de dimensies van de boog en hoofdliggers een iteratief proces met nogal wat vari-

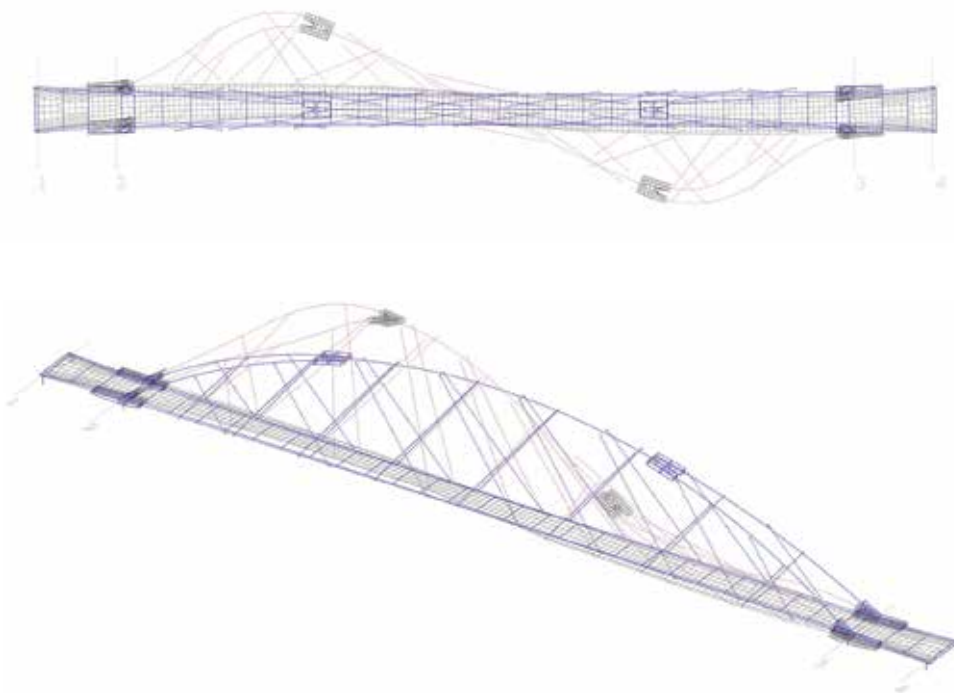
abelen. De dikte van het betonnen dek (min. 300 mm), de hangers en de boogconstructie zijn zorgvuldig op elkaar afgestemd.

Het totaal van veertig hangers conform het referentieontwerp kan niet worden ingevuld. Bij het constructief ontwerp is het aantal uiteindelijk gezamenlijk bepaald op 32 hangers. Het aantal hangers is onlosmakelijk verbonden met het gewicht van het dek.

Er dient altijd een resulterende trekkracht in de individuele hanger aanwezig te zijn.

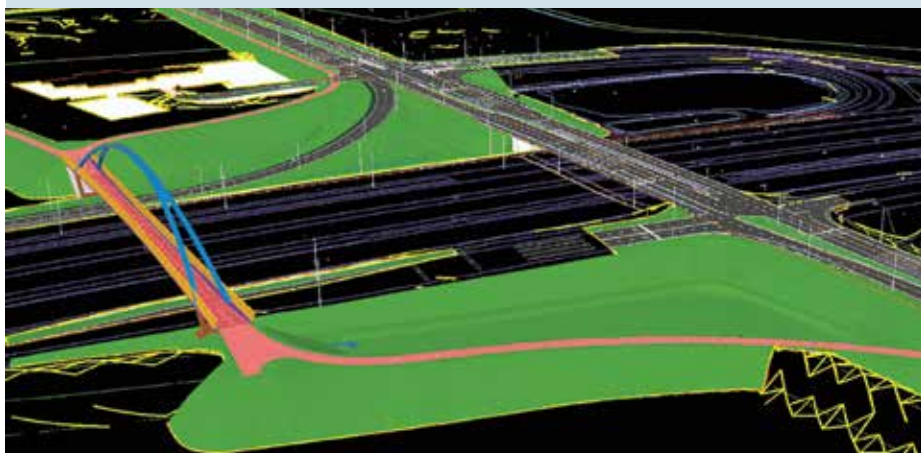
Dit is ook meteen het grote nadeel van een netwerkboogbrug als fietsbrug, een lichtgewicht dek is geen optie. Immers, wanneer er geen resulterende trekkracht in de hanger aanwezig is, is dat steunpunt voor dek en boog op dat moment ook niet aanwezig. Bij het toepassen van meer hangers wordt er per hanger te weinig gewicht gemobiliseerd. Een dek uitgevoerd met bijvoorbeeld staal of een vezelversterkte kunststof is niet zwaar genoeg om de hangers op voldoende spanning te houden. Om voldoende trekkracht in de hangers te genereren is gekozen voor beton.

De hangers vormen de ondersteuning voor de boog en het dek en bepalen dus de overspanningen. Het gewicht van het dek heeft een directe relatie met de dimensies van de

1e Knikvorm ($n = 5,56$).

Rol en werkzaamheden constructeur

Vanaf het begin heeft de constructeur een centrale rol gespeeld in het bouwteam met de Gemeente Eindhoven en de bouwcombinatie. Naast de invulling van de rollen van ontwerpleider civiel en hoofdconstructeur lag ook de BIM-coördinatie bij Wagemaker. Hierdoor behoorde niet alleen de sturing van het ontwerpproces, constructieve verantwoording en afstemming van raakvlakken tot het werkpakket maar ook het opstellen en beheer van de digitale 3D-omgeving. In augustus 2017 is gestart met het constructief ontwerp. In een open samenwerking zijn achtereenvolgens de gebruikelijke ontwerpfases van Voorontwerp tot en met Uitvoeringsgereed Ontwerp doorlopen. In de realisatiefase heeft de constructeur ook het ontwerp van de hulpconstructies voor het inrijden verricht.



boog. Immers, hoe zwaarder het dek wordt uitgevoerd, hoe meer belasting via de boog moet worden afgedragen richting de steunpunten. Het gewicht heeft dus invloed op de toetsing op sterkte en stabiliteit van de boog.

Stabiliteit boog

Met een booghoogte van uitwendig 600 mm is in het architectonisch voortraject gekozen voor een ultraslanke boog, met als bijgevolg een opgave op het gebied van stabiliteit. Onder de randvoorwaarde dat de constructie binnen de elastische vloiegrens van het materiaal blijft, is een stabiliteitsprobleem in basis het oplossen van de differentiaalvergelijking van een elastische buiglijger in de

vervormde toestand. Voor het oplossen van deze vergelijking zijn twee variabelen in het bijzonder van belang: de slankheid (relatieve stijfheid) van de constructie en de verdeling en grote van de drukspanningen (σ_{ed}) over de constructie. Met behulp van Euler is de slankheid van de constructie uit te drukken in een kritische drukspanning (σ_{cr}). De gevoeligheid van de constructie is de verhouding tussen de Eulerse kritische spanning en de werkelijk optredende spanning (σ_{ed}). Deze verhouding duidt de Eurocode aan met α_{cr} . De Eurocode schrijft voor dat bij een waarde kleiner dan 10 de spanningsverhoging significant is en de krachtswerking in de constructie dient te zijn bepaald op basis van de vervormde construc-

tie. Verder geeft de literatuur als richtlijn aan dat een kritische verhouding onder de 5 als griezelig moet worden ervaren en onder de 2 als *per definitie* instabiel^[1]. De toename ten opzichte van de onvormde constructie noemt men het tweede-orde effect.

Tijdens het ontwerpproces in het Voorlopig Ontwerp is geconstateerd dat de kritische verhouding van de boog ongeveer 3,5 bedraagt. Deze waarde bevindt zich ruimschoots onder de grenswaarde en zit midden in het gebied wat de literatuur als *griezelig* bestempeld. Sterker nog, de rekenregels uit de Eurocode zijn slechts toepasbaar tot een kritische verhouding van 3,5. De Eurocode geeft specifiek aan dat als men onder deze waarde zakt, de rekenregels van de Eurocode niet langer toepasbaar zijn. Met het oog op alle constructieve onzekerheid die nog aanwezig was in het VO, wordt bouwteambreed besloten om de slankheid van de constructie te vergroten naar een waarde van minimaal 5,5, met als randvoorwaarde dat het architectonisch beeld zo veel als mogelijk dient te worden behouden.

De vraag is nu hoe de slankheid van de boog te vergroten is zonder de uitwendige afmetingen te wijzigen? Om deze vraag te beantwoorden, moet de dominante knikvorm bekend zijn. Bij deze netwerkboog is de dominante knikvorm zijdelings, uit het vlak van de boog. Dit komt omdat de boog in haar vlak door de hangers wordt gesteund. Hierdoor kan de boog in principe niet in het vlak uitknikken.

Aanpassingen

Als eerste is de slankheid verhoogd door in de vormgeving van de boog zo veel mogelijk rekening te houden met de stabiliteit uit het



De SPMT's zijn zo dicht mogelijk bij de definitieve steunpunten geplaatst.



Hulpwerk: drukstaven, knikversterking hangers en trekstaven.

vlak. Door de boog richting de opleggingen (extra) verbreed uit te laten lopen, ontstaat een stabiele basis bij de booggeboorte waardoor de boog stevig op het dek in te klemmen is. Verder is gekozen om materiaal aan de zijvlakken van de boog toe te voegen en daarmee de horizontale buigstijfheid (EI_x) van de boog te vergroten. Met de berekende knikvormen zijn de buigpunten in de constructie te bepalen. Door specifiek op deze plekken extra materiaal toe te voegen kon met weinig extra materiaal veel relatieve stijfheid worden toegevoegd. Als laatste is ervoor gekozen om de booggeboorte en het broekstuk (overgang van de twee boogbenen naar één brede boog) gedetailleerder te modelleren uit 2D-platen. Hiermee wordt beter inzicht verkregen in het stijfheidsgedrag van deze onderdelen.

Hoewel bovenvermelde maatregelen een flinke verbetering waren op de stabiliteit van de boog blijken ze niet afdoende. Het verder opdikken van de zijpanelen van de boog is met het oog op de kosten niet gewenst. Vandaar dat uiteindelijk is besloten om de doorsnede van de boog met 100 mm te vergroten, zowel in breedte als in hoogte.

Materiaalzuinig

Tijdens de uitwerking van het constructief Voorontwerp naar een Definitief Ontwerp is steeds heel dicht bij de ondergrens gebleven. Dit is gedaan om materiaal te besparen. Immers wanneer er materiaal wordt toegevoegd zijn meer grondstoffen nodig en wordt de brug duurder.

Er is een materiaalzuinig ontwerp gemaakt. Het besparen op materiaal was ook noodzakelijk om de kosten voor de opdrachtgever zo laag mogelijk te houden vanwege het beschikbaar budget. Het is echter goed om te realiseren dat materiaal besparen ook meer rekenwerk vergt.

Voor het bouwen en inrijden zijn er weinig materiaalreserves in de brug beschikbaar. Vanwege materiaalbesparingen gaan veel unity checks richting 1. Als gevolg hiervan zijn vrij complexe hulpconstructies nodig om de brug te kunnen inrijden. Uiteraard met als randvoorwaarde in deze fase geen afbreuk aan vormgeving te doen. Het is een aanbeveling bij het ontwerp in de unity checks wat ruimte te reserveren voor het inrijden van de brug.

Hulpconstructies inrijden

Het inrijden gebeurt in het weekend van 29 en 30 augustus 2020. De SPMT's zijn zo dicht mogelijk bij de definitieve steunpunten geplaatst. In de praktijk betekende dit een afstand van 5,3 m uit de definitieve opleggingen. Tijdens het inrijden diende de belasting door de boog dus afgevoerd te worden naar de SPMT's in plaats van naar de booggeboorten. Om dit mogelijk te maken zijn tijdelijke voorzieningen aangebracht:

- drukstaven tussen dek en boog;
- voorgespannen trekstaven tussen drukker en betonnen dek;
- versterkende profielen rondom een achttal hangers om uitknikken van de hangers tijdens inrijden te voorkomen.

De extra drukstaven bestaan uit ronde buisprofielen tussen hoofdligger en boog. De drukstaven zijn uitgerust met vijzels zodat de krachten gestuurd kunnen worden. Tussen het betonnen dek en de drukstaven worden voorgespannen trekstaven gemonteerd. Om de bevestiging op het beton mogelijk te maken, is een stalen schoen gemaakt die met vier rijen van elf stuks M30 bouten verbonden is met het beton. Hierbij wordt per aansluiting een oppervlak van $0,75 \times 1,75 \text{ m}^2$ gemobiliseerd. Dit oppervlak is noodzakelijk om te kunnen voldoen aan de constructieve toetsen van het betonnen rijdek. De verbindingen van het hulpwerk op het betondek heeft ook zijn uitwerking op de wapening en het betonmengsel.

Het betondek is op de locaties van de bevestiging van de trekstaven voorzien van extra wapening. Met de reeds aanwezige wapening voor de opname van uitwendige belastingen, temperatueffecten en krimp is de grens van het haalbare opgezocht. Om het werk buiten te kunnen maken, zijn een soort lego-boekjes gemaakt, waarin de wapening laag voor laag staat aangegeven. Tevens wordt er speciale aandacht geschonken aan het betonmengsel. Hiervoor is advies ingewonnen bij Betoned uit Heiloo. Er zijn verschillende mengsels uitgewerkt om te kunnen anticiperen op de weersomstandigheden. Uiteindelijk zijn de velden met de aansluitingen voor het hulpwerk gestort met een maximale korrelgrootte 8 mm. Het dek is in één keer gestort en bestaat volledig uit in het werk gestort beton.

Literatuur

1. D. Dicke, *Stabiliteit voor ontwerpers*, 2005.
2. *Ontwerp van voetgangersbruggen, ontwerprichtlijn*, HIVOSS 2008.
3. *NEN-EN 1991-2* (Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen), 2015 + C1, 2015 + NB, 2019.



De brug ligt op ruim 7 m boven de rijksweg. Een berekening op aanrijding kan hierdoor achterwege blijven, behoudens bij de afrit van de N2.

Tijdens de uitvoering schenkt de aannemer de nodige aandacht aan de behandeling na de betonstort. Het resultaat mag er zijn.

Trillingen

In het ontwerp zijn hangertrillingen beoordeeld. Na berekening is duidelijk dat trillingen als gevolg van Vortex-excitatie en een combinatie van wind en regen geen probleem zullen vormen.

Rekentechnisch kunnen galloping bij ijsvorming op de hanger en parametrische excitatie niet worden aangetoond. De eigenfrequenties van de hangers liggen in dezelfde range als de eigenfrequentie van het dek. In de ontwerp-fase is toen besloten om TNO de brug na montage te laten doormeten. Om te anticiperen op tegenvallende resultaten is onder het dek ruimte gereserveerd voor het aanbrengen van dempers.

Nadat de brug volledig is afgebouwd, zijn metingen verricht om de hangerfrequenties en

hangerkrachten te bepalen. Uit de metingen volgde een veel grotere demping van de brug dan in de hoofdberekening is aangehouden. Deze gegevens zijn verwerkt in de berekeningen. Nog steeds blijken de frequenties van meerdere hangers in de buurt van de frequentie van het dek te liggen. Parametrische excitatie zal echter niet kunnen optreden doordat het slechts enkele hangers betreft. Het effect waarbij hangertrillingen versterkt worden door dektrillingen, het opslingeren, zal hierdoor niet optreden. Dempers blijken niet nodig.

Naast de berekening op hangertrillingen is het dek ook berekend op dynamische belasting door joggers. De dynamische belastingen zijn in rekening gebracht volgens de richtlijn *Ontwerp van voetgangersbruggen*^[2].

Bij het DO in 2018 is specifiek voor de joggerbelasting gebruik gemaakt van NEN-EN 1991-2^[3]. Dit is een ontwerpdocument en destijds niet bekrachtigd door het bouwbe-

sluit. Uiteindelijk is in 2019 een wijziging van onder andere de joggerbelasting in de Nationale Bijlage van NEN-EN 1991-2 opgenomen, omdat de gegeven belastingen in de versie van 2011 niet overeenkwamen met de dagelijkse praktijk. Concreet zijn zes joggers in rekening gebracht in plaats van tien.

Aanrijding

De brug ligt op ruim 7 m boven de rijksweg. Een berekening op aanrijding kan hierdoor achterwege blijven, behoudens bij de afrit van de N2. Hier is de ruimte tussen het wegdek en de brug minder dan 7 m. Om eventuele aanrijdkrachten op te kunnen nemen zijn de hoofdliggers versterkt en voorzien van dwarschotten. Daarnaast zijn aanslagnokken aanwezig op het tussensteunpunt en een dwarsblokkering bij het landhoofd. De brug kan de vervormingen door temperatuuereffecten vrij volgen. Enkel bij aanrijding worden de aanslagnokken gemobiliseerd. •