

Spotten met buigstijfheid

Parametrisch ontworpen, superslank en fijntjes aangelicht. Met fietsbrug Tegenbosch over de A2 nabij Eindhoven Airport is Nederland een netwerkboogbrug rijker. De 160 m lange stalen brug vormt een belangrijke aanvulling op het fietsroutenetwerk.





ir. C. van den Berg

Christa van den Berg is tekstschrijver bij ipv Delft.

De verkeerssituatie op en rond de Anthony Fokkerweg in Eindhoven is toe aan verbetering. Een van de oplossingen is een nieuwe fietsbrug over de A2. Na wat omzwervingen (zie kader), kiest de gemeente voor een fietsbrug ten zuiden van het bestaande viaduct. Een uitgesproken en eigentijds ontwerp, dat past bij Eindhoven als stad van innovatie en techniek. De slanke en transparante staalconstructie overbrugt alle veertien rijbanen van de A2 en N2 inclusief toe- en afritten in één overspanning.

Automobilisten behouden optimaal zicht op de verkeerssituatie en de afwezigheid van tussensteunpunten houdt de mogelijkheid van eventuele toekomstige veranderingen in wegindeling open.

Parametrisch ontwerp

Constructief gezien is een netwerkboog geen gemakkelijke opgave. De constructie is meervoudig statisch onbepaald, waardoor de nodige berekeningen complex zijn en niet handmatig kunnen worden uitgevoerd. Dankzij parametrisch software is het ontwerpen van netwerkbogen sinds kort een stuk eenvoudiger.

Met de combinatie Rhino(ceros), Grasshopper en plug-in Karamba is een 3D-model van de constructie gemaakt, waarmee live berekeningen kunnen worden gemaakt en dus elke aanpassing constructief wordt doorgerekend. Doel is de geometrie te optimaliseren, waarbij bijvoorbeeld booghoopte, aantal hangers, booglengte en diameter van de hangers enkele parameters zijn.

De verschillende ontwerpvarianten zijn behalve op constructieve efficiëntie en beeldkwaliteit eenvoudig te vergelijken op materiaalgebruik en krachtwerving.

De ontwerper draagt tijdens de parametrisch studie twee petten: van architect en van constructeur. Noem het *archineering*, waarbij architectonisch wensen en constructieve in één vat worden gegoten, dus de architectonisch optimalisatie is niet op zichzelf staand.

Gevorkte boog

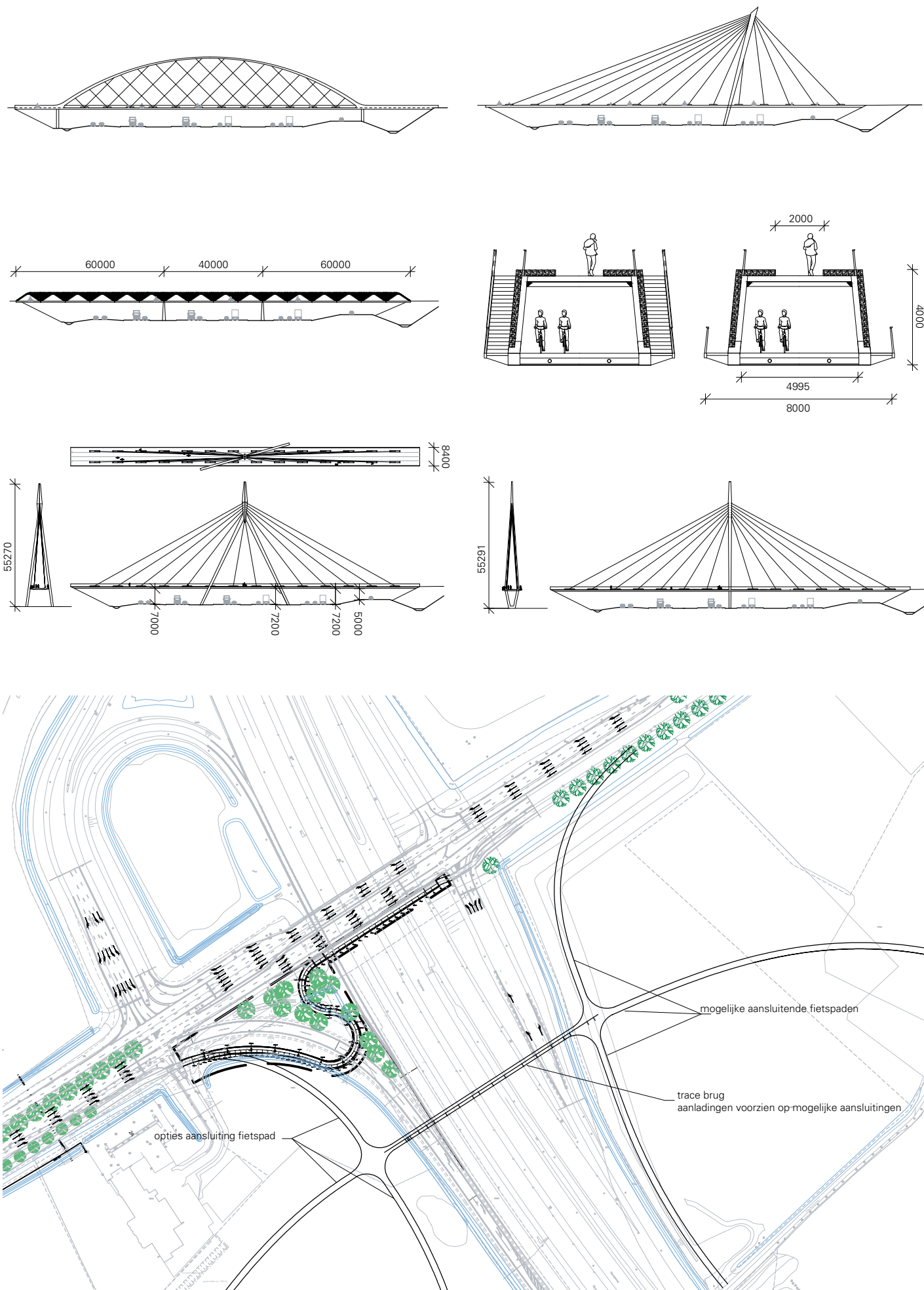
De constructie bestaat uit twee horizontale stalen kokerliggers, met daartussen stalen dwarsspanten en een betonnen rijdek, en een gevorkte boog, ook opgebouwd uit kokers. Tussen boog en liggers bevinden zich 32 kruislings geplaatste massief stalen hangers. De gehele constructie ligt op twee in het werk

gestorte betonnen steunpunten en heeft een hoofdoverspanning van 130 m.

In vergelijking met een traditionele vakwerkboog heeft een netwerkboog meer hangers en meer verbindingen. De kruislingse plaatsing van de hangers voorkomt het uitknikken van de boogconstructie. Momenten in boog en langsliggers zijn relatief klein, waardoor deze een stuk slanker kunnen zijn dan bij een vakwerkboog. Het betonnen dek zorgt ervoor dat de hangers altijd op trek belast zijn.

Opbouw op locatie

De boogbrug is geproduceerd in de werkplaatsen van CSM Steelstructures en vervolgens in onderdelen naar de tijdelijke bouwlocatie langs de A2 gereden. Daar kan de brug zonder verkeershinder of overlast in elkaar gezet worden. Na het samenstellen van de constructie en het aanbrengen van wapening, volgt het storten van het betondek. Na het aanbrengen van de hekwerken en verlichting, wordt de brug voorzien van tijdelijke hulpconstructies. Voor de plaatsing is een nachtelijke afsluiting van de snelweg onvermijdelijk. In de nacht van 29 op 30 augustus is de brug in een tijdsbestek van zes uur op zelfrijdende platformwagens naar haar eindbestemming gereden, daar langzaam omhoog gevijzeld en zijwaarts



Variantenstudie (boven) en (onder) situatie met onderin de gerealiseerde brug en bovenin het initiële ontwerp.

Projectgegevens

Opdracht Gemeente Eindhoven • Architectuur ipv Delft • Constructief ontwerp Wagemaker, Rosmalen • Uitvoering Combinatie Dura Vermeer-Ploegam • Staalconstructie CSM Steelstructures, Hamont-Achel (B) • Lichtontwerp ipv Delft/StudioKruizinga, Signify-Heijmans • Plaatsing Mammoet, Schiedam • Controlerende instantie ontwerpdocumenten TNO, Delft • Oplevering medio november 2020 • Kosten ± 9,8 miljoen euro • Staalgebruik 700 ton (waarvan 50 ton hulpconstructies) • Fotografie Paul Poels, ipv Delft/Henk Saterse



op de twee hoofdsteunpunten geplaatst. De fietsbrug Tegenbosch, vernoemd naar een historische hoeve uit de omgeving, is in bouwteamverband gerealiseerd. Ontwerpbureau ipv Delft maakt het VO en ziet tijdens de verdere uitwerking en uitvoering toe op de beeldkwaliteit en constructieve efficiëntie.

Ruime opzet

De brug sluit aan op de doorgaande fietsroute langs de Anthony Fokkerweg, maar ook op recreatieve fietsroutes in de regio. Fietsers kunnen nu zonder stoplichten de A2 oversteken. Om de veiligheid van alle fietsers, ongeacht hun snelheid, te garanderen, zijn de toeleidende fietspaden ruim opgezet en de bochtstralen op de kruisingen en splitsingen rond de brug afgestemd op relatief hoge snelheden. De brug heeft een dek van vijf m breed: vier fietsers en een voetganger naast elkaar. Aan de uiteinden waaiert het dek uit tot een breedte van circa zeven meter, als uitnodigend gebaar richting gebruiker. Voor de veiligheid van automobilisten is de brug voorzien van een speciaal ontworpen

netkooi, een anti-vandalisme maatregel. De stalen staanders van dit gaasscherm staan op de brugrand, voor gebruikers achter de reguliere leuning. Om de staanders visueel op te laten gaan in het geheel, volgen de staanders de schuine lijnen van de hangers. Naast de minimale verkeershinder (tijdens bouw en plaatsing) en de scheiding van snel en langzaam verkeer, heeft de gekozen locatie en het brugtype als voordeel dat automobilisten vrij zicht hebben op het wegverloop, verkeersborden en de op- en afritten. Plaatsing van de nieuwe brug dicht bij het bestaande viaduct, of er juist nog verder vanaf, zou dit vrije zicht negatief hebben beïnvloed. Dat geldt ook voor tussensteunpunten.

Dynamische verlichting

Geheel passend bij Eindhoven's imago als dé lichtstad, maakt geïntegreerde verlichting ook deel uit van het brugontwerp. In de maatwerk ontworpen handregel van het hekwerk zit ledverlichting, die zowel brugdek als bruggebruikers verlicht. Er is gekozen voor dynamische verlichting

Wat vooraf ging

Het is eind 2016 wanneer de gemeente Eindhoven plannen maakt om het viaduct in de Anthony Fokkerweg over de A2 en parallelweg N2 te verbreden. Uitgangspunt is een extra rijbaan voor snelverkeer en een nieuwe fietsbrug tegen het viaduct aan. Na de ervaringen met fietsrotonde de Hovenring, schakelt de gemeente hetzelfde ontwerpbureau in om een verbreed viaduct met apart fietspad en een fietsbrug over de toerit te ontwerpen. Er volgt een studie voor de fietsbrug over de toerit, al geeft de ontwerper al vroeg in het project aan dat een aparte fietsbrug net iets verderop wellicht een betere optie zou zijn. Wanneer er binnen de gemeente extra budget beschikbaar komt, worden toch de mogelijkheden van een aparte fietsbrug onderzocht. Dit leidt tot de bouw van een 160 m lange fietsbrug iets ten zuiden van het bestaande viaduct, die alle rijbanen in één soepele beweging overbrugt, met een doorrijhoogte van minimaal zeven meter. De verbreding van de Anthony Fokkerweg voor autoverkeer en de bouw van de nieuwe fietsbrug maken deel uit van een groot aantal aanpassingen aan de wegenstructuur in Eindhoven Noordwest, om bereikbaarheid en doorstroming te verbeteren. Zie www.eindhoven.nl/noordwest

die met de fietser meebeweegt. Aan de uiteinden van het hekwerk zitten sensoren die de snelheid van de fietsers detecteren, op basis daarvan beweegt een gekleurde lichtvlek mee in de lichtlijn in de handregel. Deze beweegt over de standaard witte handregelverlichting heen. Toepassing van een lichtgrijze slijtlaag zorgt ervoor dat het dynamisch effect goed tot zijn recht komt.

Daarnaast lichten spots op de bovenzijde van de staanders van het anti-vandalisme scherm de binnenzijde van de boog aan. De bekabeling voor deze verlichting bevindt zich in de handregel. De rvs handregel bestaat uit twee helften. De onderste helft is gemonteerd op de balusters, de bovenste helft is afneembaar. Zowel de armaturen als de kabels zijn op deze manier eenvoudig bereikbaar voor onderhoud. Alle lichtbronnen zijn computergestuurd en RGBW (RGB-chip plus extra led-chip), waardoor het mogelijk is kleur- en lichteffecten toe te passen bij speciale gelegenheden. Voor het aanlichten van de netwerkboog is een lichtprogramma ontworpen en ingesteld, dat de brug per seizoen in een ander licht zet. •



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-

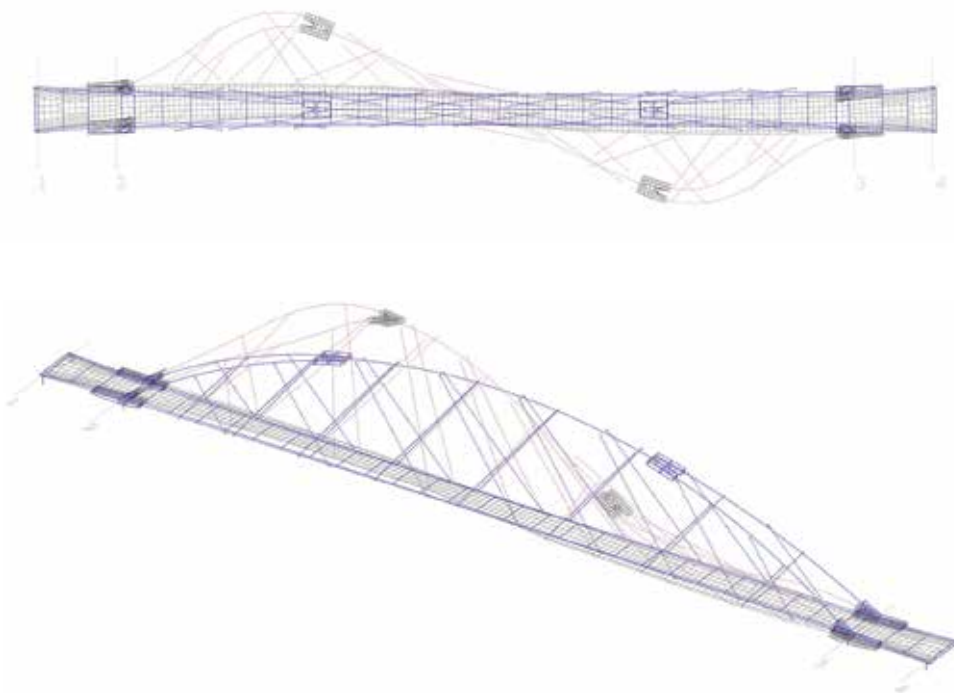
abelen. De dikte van het betonnen dek (min. 300 mm), de hangers en de boogconstructie zijn zorgvuldig op elkaar afgestemd.

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.

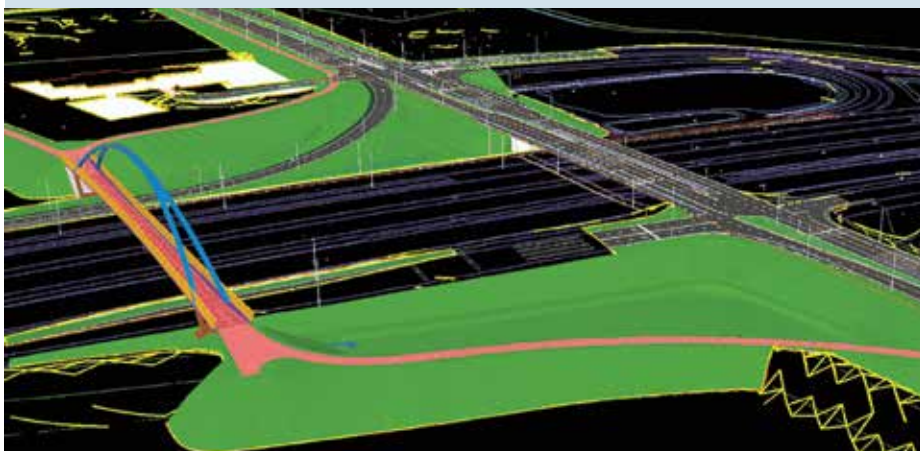
Dit is ook meteen het grote nadeel van een netwerkboogbrug als fietsbrug, een lichtgewicht dek is geen optie. Immers, wanneer er geen resulterende trekkracht in de hanger aanwezig is, is dat steunpunt voor dek en boog op dat moment ook niet aanwezig. Bij het toepassen van meer hangers wordt er per hanger 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 onvervormde 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 temperatueffecten vrij volgen. Enkel bij aanrijding worden de aanslagnokken gemobiliseerd. •

Duidelijk stappenplan

Nadat het ontwerp en het DO is afgerond, is de staalbouwer in juni 2019 definitief aangesloten. Omdat er een gedeelde verantwoordelijkheid is van de montagestudie, is het belangrijk om in een vroegtijdig stadium een duidelijk stappenplan voorhanden te hebben hoe de brug gemonteerd wordt. CSM is verantwoordelijk voor de volledige opbouw van de brug tot het storten van het wegdek. Constructeur en staalbouwer rekenen samen het montageplan van het inrijden uit.

ir. J. Vankevelaer

Jules Vankevelaer is projectmanager bij CSM Steelstructures in Hamont-Achel (B).

Eerst en vooral moeten de posities van de SPMT's (Self Propelled Modular Transporter) bepaald worden. Om deze positie vast te leggen moet er rekening gehouden worden met twee randvoorwaarden. Tijdens het inrijden mag er geen hulpconstructie boven de A2 komen, want deze mag na het inrijden niet meer gehinderd worden. Een andere randvoorwaarde is het totaalgewicht van de brug. Doordat er geopteerd is om de brug volledig op de voorbouwlocatie kant en klaar gereed te maken, zal de brug een totaalgewicht hebben van 1600 ton. Om zo'n hoog gewicht in te rijden moet er gewerkt worden met een dubbele rij SPMT's. Rekening houdend hiermee zal het tijdelijk oplegpunt genomen worden op 5 m vanuit de as van de pijler. Het is belangrijk om deze afstand te beperken tot een minimum om zo de hoeveelheid hulpstaal tijdens het inrijden te beperken. Als deze maat vastgelegd is, moet de brug volledig constructief nagerekend worden om zo eventuele plaatdiktes in de brug te verhogen.

Bepalen delingen

Omdat de brug aangevoerd moet worden via de weg, is een volgende belangrijke stap het bepalen van het aantal delingen van de wegdekliggers en de boogdelen. Het streven is om deze in zo groot mogelijke transporteerbare delen aan te voeren, waarbij er ook rekening gehouden moet worden met het totale gewicht per onderdeel. Het grootste gewicht van de brug is gelokaliseerd bij de booggeboortes en het broekstuk van de bogen. Uiteindelijk wordt de 160 m lange hoofdlig-

ger opgedeeld in 2x6 delen. De afmetingen van de onderdelen variëren van 23,8 m tot 33,1 m. De boog bestaat uit vier aanbogen, elk met een lengte van 35,4 m. De middenboog wordt opgedeeld in drie delen waarbij er behalve het gewicht ook rekening gehouden moet worden met de totale breedte. De afmetingen van de broekstukken hebben een lengte van 18,5 m, een breedte van 3,7 m en een gewicht van 35 ton. Het langste (35,4 m) en zwaarste onderdeel (41 ton) dat naar de voormontageplaats getransporteerd wordt, is het middelste deel van de middenboog.

Planning productie

Om de planning van het inrijden op 29 augustus 2020 te halen, moeten de eerste spullen worden geleverd in januari op de voorbouwlocatie. Dit betekent dat er ook gestart moet worden in september met de productie van de brugdelen. Er is zodoende slechts drie maanden tijd in het engineeringstraject om de eerste werkplaatstekeningen klaar te hebben. Om een maximale overlap te krijgen in de planning met engineering en de productie, wordt geopteerd om de brugdelen in twee fases vrij te geven voor productie. In de eerste fase wordt er enkel gefocust op de interne opbouw van de brug; in een tweede fase worden alle onderdelen toegevoegd die aan de buitenzijde gelast worden. De brug wordt volledig gemodelleerd met Tekla. In dit model worden alle platen tot in het detail uitgewerkt. Zo worden de exacte materiaal- en montagegedelingen toegevoegd, als ook de lasnaadvoorbewerkingen, vormschotten et



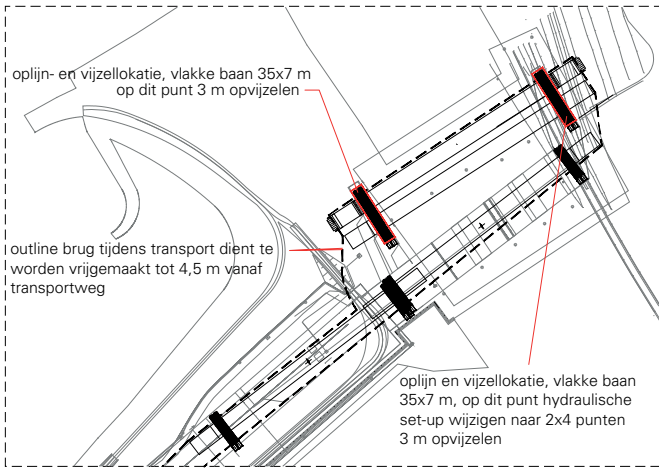
Materiaaldelingen in verschillende kleuren.

cetera. Uit het softwareprogramma kunnen er dan eenvoudig tekeningen gegenereerd worden van alle individuele platen (positietekeningen), als ook alle samensteltekeningen van ieder afzonderlijk brugdeel (merktekeningen). In een later stadium wordt een revisie gemaakt van al deze tekeningen wanneer alle bijkomende voorzieningen bekend zijn, zoals bevestigingen van het veiligheidsnet, de veiligheidskolommen, de leuning en de hijsogen

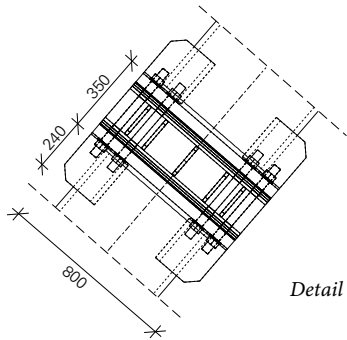
Kenmerkpunten inmeten

Om een vlotte montage te kunnen garanderen, worden de verschillende brugdelen aangelegd in de productiehallen. Alle onderdelen krijgen op vooraf bepaalde locaties kenmerkpunten. Bij iedere opstelling zijn al deze punten digitaal ingemeten met een theodoliet. Al deze inmetingen worden in het 3D-model over elkaar gelegd zodat de afwijkingen ten opzichte van het theoretisch model op een eenvoudige manier kunnen worden vastgesteld. Ook tijdens de montage worden deze punten gebruikt om de brug te richten. Buiten de maatcontroles zijn ook alle werflasvoegen gecontroleerd in de productiehallen.

De brug moet voldoen aan EXC4 volgens de Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken (ROK). Dit betekent dat er strenge eisen zijn aan het materiaal wat gebruikt mag worden. Ook moeten alle (door)lassingen, naast een visuele inspectie, voorzien zijn van een externe magnetische (MT) en ultrasoon (UT) onderzoek. Met het magnetisch onderzoek kan de las aan



Bovenaanzicht transportroute tijdens stremming.

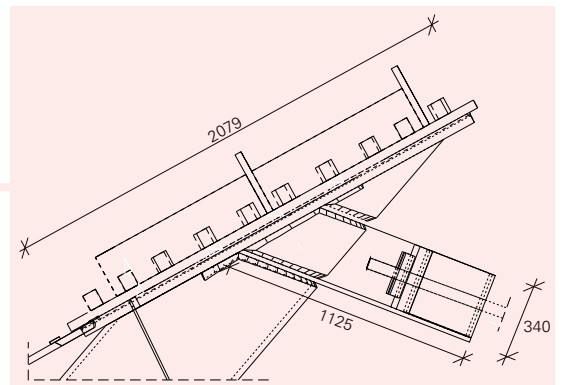
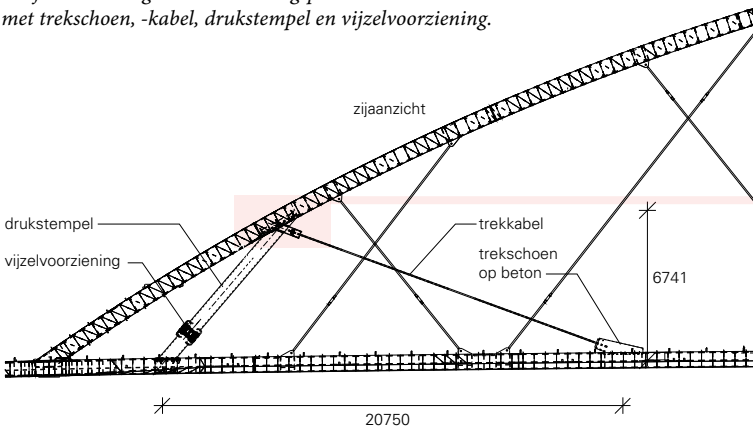


Detail vijzelvoorziening.

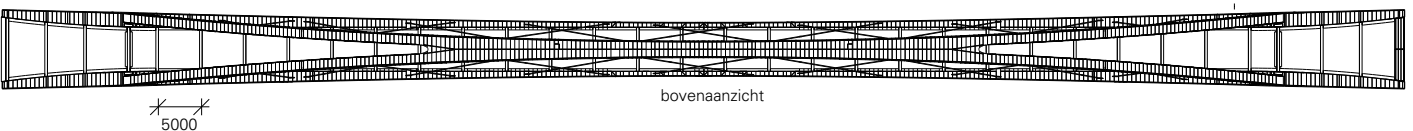


bovenaanzicht

Inrijvoorzieningen ondersteuningspunten SPMT's met trekschoen, -kabel, drukstempel en vijzelvoorziening.

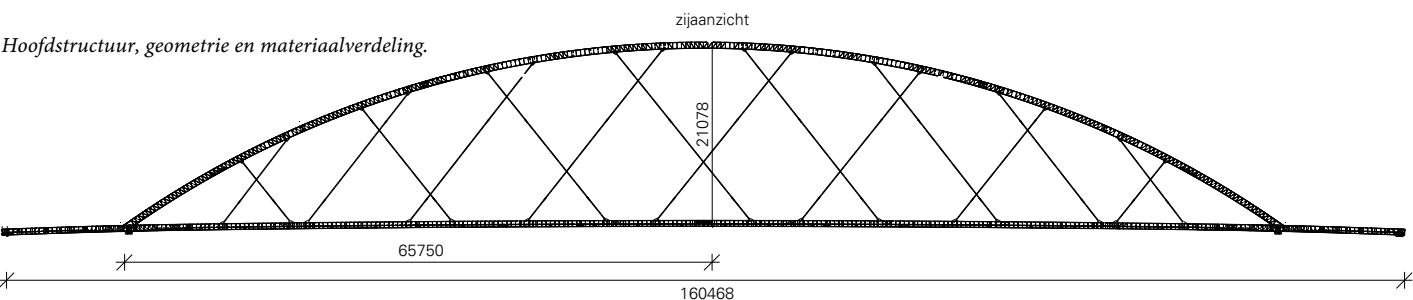


Drukstempel en trekkabel aan de boog.



bovenaanzicht

Hoofdstructuur, geometrie en materiaalverdeling.



zijaanzicht



Broekstuk waarbij de boog van twee losse bogen overgaat in één boog.



(Door)lassingen krijgen extern magnetisch en ultrasoon onderzoek.



Opstelling met middenboog (drie segmenten) volledig gemonteerd.



De deuvels tegen zijkant wegdekligger worden toegevoegd op de bouwplaats.

het oppervlak gecontroleerd op onder andere scheurvorming. Met het ultrasoon onderzoek gaat er een taster met geluidsgolven over het staaloppervlak. Imperfecties in de las zullen reageren met deze golven waardoor er fouten in de las gevonden kunnen worden.

Conservering

Nadat een brugdeel volledig afgelast is, begint de opbouw van het hoogwaardig conserveringssysteem. De verschillende onderdelen zijn gestraald conform SA3 gevolgd door een metallisatielaag van 150 μ en een sealer. Daarna is er een tussenlaag en een polyurethaan eindlaag geplaatst waardoor de totale laagdikte 350 μ bedraagt. Bij de verschillende werfvoegen is de verlaag afgeplakt conform *back stepping* waardoor iedere verlaag 5 cm extra wordt afgeplakt. Het voordeel van deze methode is dat het conserveringssysteem op de bouwplaats op een kwalitatieve wijze laag per laag opgebouwd kan worden. Tot slot wordt de brug voorzien van een volledige anti-graffiti coating zodat er geen kleurverschil

len zijn. In principe hoeft de volledige brug niet anti-graffiti behandeld te worden. Indien men opteert om twee verschillende eindlagen aan te brengen, zal er bijgevolg ook twee verschillende producten gebruikt worden. Een gevolg hiervan kan zijn, dat er kleurverschil kan optreden. Om dit op te lossen is dus gekozen om één eindlaag toe te passen.

Voorbouwlocatie

In januari 2020, exact een half jaar na de gunning, zijn de eerste onderdelen getransporteerd naar de voorbouwlocatie, ongeveer op 100 m van de definitieve plaats. Eerst is gestart met de opbouw van de hulpconstructie onder het wegdek. Deze worden zodanig gepositioneerd zodat het wegdek in de juiste bouwzeeg ligt. Door de keuze om alle hijsogen nabij de werfvoegen te plaatsen, staan deze te ver uit elkaar om de stukken te lossen met één mobiele kraan. Daarom zijn de twaalf hoofdliggers gelast met telkens twee mobiele kranen. Indien de hijsogen buiten de werfzone geplaatst worden, zal er bij

het afslijpen hiervan extra werk zijn om de conservering bij te werken.

Terwijl het wegdek vervolledigd wordt met de montage van de dwarsdragers, start de opbouw van de middenboog. Deze bestaat uit drie losse segmenten die naast het wegdek op de grond aan elkaar gelast zijn tot een geheel van 70 m lang en een totaal hijsgewicht van 111 ton. Nadien wordt het geheel ingehesen met een duo-lift van 2x700 ton's kranen. Vooraf aan deze grote hijsoperatie worden er drie grote torens geplaatst op het wegdek. Op de twee buitenste torens worden de aanbogen gelegd. De middelste toren is noodzakelijk om de doorbuiging van middenboog te compenseren. Nadat het geheel gelast is kunnen de hulptorens verwijderd worden. In deze fase zijn ook de definitieve spanningsloze inbouw lengtes bepaald van alle hangers. Om deze vlekkeloos te monteren, wordt het wegdek tijdelijk in een extra bouwzeeg geplaatst.

Voorbereiden plaatsing

Drie weken na de stort van het wegdek is in



De drie segmenten van de middenboog zijn naast het wegdek aan elkaar gelast....



...en daarna ingehesen op drie tijdelijke torens op de voorbouwlocatie.



In de week voor inrijden worden de SPMT's gekoppeld tot 2 sets van 2x14 assen.



Van 29 op 30 augustus zijn de N2 en A2 afgesloten voor een tijdslot van 10 uur.

begin augustus de brug gelijkmatig ontlast door een vijzelactie uit te voeren van ongeveer 30 cm onder de vijzelpunten naast de definitieve oplegpunten. Door deze methode wordt de brug op een gecontroleerde manier belast. Vooraleer gestart kan worden met het inrijden moet de hulpconstructie in de brug geactiveerd worden: telkens worden de twee buitenste hangers versterkt tegen de kniklast. Ook zijn er vier tijdelijke drukschoren toegevoegd op plaatsen waar krachtsinleiding van de SPMT's zijn (5 m vanuit de as). Deze schoor zal de kracht overbrengen van het wegdek naar de boog. Om ervoor te zorgen dat de boog niet overbelast wordt, zijn er vervolgens telkens twee trekstaven die op voorspanning gebracht worden om de trekkracht terug in het wegdek te krijgen. In de week voor het inrijden worden diverse voorbereidingen gedaan. Zo worden de SPMT's gekoppeld tot twee sets van 2x14 assen. Boven op iedere set staan twee grote vijzeltorens. Vervolgens wordt de brug 3 m hoger gevijzeld met vier klimvijzels van 600

ton die onder de opleggingen van de brug staan. Vervolgens rijden de SPMT's onder de brug en nemen deze de brug over van de klimvijzels. Tot slot wordt er nog een extra meter op de SPMT's gevijzeld zodat de uiteindelijke inrijhoogte ongeveer 5 m onder de opleggingen is. Tijdelijke zijstoppers worden toegevoegd voor en achter de vijzel om de stabiliteit tijdens het dwarsoversteken van de A2 te garanderen.

Nachtelijke plaatsing

In de nacht van zaterdag 29 op zondag 30 augustus waren de N2 en A2 volledig afgesloten voor een tijdslot van 10 uur om de volledige inrijoperatie te voltooien. Deze bestaat uit een viertal stappen: in eerste instantie rijden de SPMT's dwars over de snelweg. Nadien draaien de wielen 90° en rijden deze evenwijdig met de autosnelweg en stoppen deze net voor de definitieve betonnen landhoofden. Vervolgens is er nog een bijkomende vijzelactie van 3 m uitgevoerd om boven de landhoofden uit te komen. Tot slot moet er

uiterst langzaam gereden worden tot op de exacte locatie omdat het een kritische hoogte is zonder extra hulpconstructie (zijstoppers werken niet meer). Een belangrijk item hier is ook de ondergrond waarop gereden wordt. Beide locaties zijn exact op elkaar afgestemd zodat deze beide op dezelfde hoogte zijn. Vanaf het moment dat de brug op de juiste positie staat, zal het geheel tijdelijk afgelegd worden op hulpstructuren die voorzien zijn op alle landhoofden en pijlers. Na de montage van de brug worden alle oplegtoestellen ingestort en vervolgens geactiveerd door de hulpconstructie te verwijderen. Het tijdelijk staal dat nog aanwezig is in de brug (trek- en drukschoren, knikverstijvers rondom de hangers) moet gedurende enkele nachten gedemonteerd worden. Tijdens deze werken is de afrit en een rijstrook van de N2 afgesloten. Op deze manier is de hinder beperkt tot een minimum. Tot slot wordt de brug met de montage van de rvs leuningen en afdekkappen op de landhoofden volledig afgewerkt. •