



Met een integraal ontwerpteam vanaf start project, waarin alle benodigde kennis (constructie, dynamica, spoor, architectuur, bouwmethode en geluidsemissie) wordt opgenomen, is het gelukt om één van de grootste stalen spoorboogbruggen in Europa te realiseren met minimale omgevingshinder.

ir. P.J.C. van Lierop en ir. W.P.J. Langedijk RO

Pieter van Lierop is ontwerp Leider SAAone en Walter Langedijk is hoofdconstructeur SAAone en werken beiden bij Ivm-Infra in Haarlem.

Het project SAA-A1/A6 Diemen-Almere Havendreef (SAA = Schiphol-Amsterdam-Almere) is onderdeel van de grootschalige verbreding van de corridor Schiphol-Amsterdam-Almere. Sinds een aantal jaar is Rijkswaterstaat de snelwegen in dit traject aan het uitbreiden met als doel om de verkeersdoorstroming te verbeteren. Tegelijkertijd verbetert Rijkswaterstaat de leefbaarheid van het gebied. De werkzaamheden van SAA worden uitgevoerd op basis van een DBFM-contract, door SAAone, een combinatie van Volker-

Wessels, Boskalis, Hochtief en DIF. Onderdeel van het project is de nieuwe spoorbrug over de A1, in de buurt van verkeersknooppunt Muiderberg. Omdat het aantal rijstroken op deze locatie zal worden verdubbeld, moet het bestaande betonnen spoorwegviaduct, die de weg onder een hoek van $\pm 27^\circ$ kruist, worden vervangen door een nieuwe stalen spoorbrug. Om aanpassing van de rijstroken in de toekomst mogelijk te maken, moet de brug met één enkele overspanning worden uitgevoerd.

De ligging van het spoor mag niet worden gewijzigd en tijdens de bouw van de brug moet hinder van het wegverkeer, alsmede het treinverkeer, worden teruggebracht tot een minimum. Er zijn slechts twee korte buitendienststellingen van het spoor (van maximaal 52 uur en 120 uur) en slechts één kortdurende afsluiting van de rijweg toegestaan. Om aan deze eisen te kunnen voldoen, ligt tijdens het ontwerpproces de focus op de assemblage- en montagemethode.

Bouwmethode

De aangewezen bouwmethode, conform het referentieontwerp van RWS, bestaat uit het bouwen van een tijdelijke bypass van de spoorlijn parallel aan de bestaande spoorbrug. Zo kan de bestaande brug worden afgebroken en de nieuwe brug op de bestaande positie worden gebouwd. Het nadeel is dat de treinen gedurende de bouw



Tijdelijke bypass van de spoorlijn parallel aan de bestaande spoorbrug.

met beperkte snelheid moeten rijden, wat leidt tot extra hinder van het treinverkeer. In de tenderfase leidt een variantenstudie tot een alternatieve bouwmethode met minder verkeershinder. Daarbij wordt de bestaande brug in bedrijf gehouden, terwijl de nieuwe brug wordt geassembleerd langs de snelweg en evenwijdig aan de spoorlijn. De brug (± 8.500 ton staal, met inbegrip van de wapening en bekisting van het betonnen dek) wordt met SPMT's in zijn geheel over de snelweg getransporteerd naar een tijdelijke positie parallel aan de huidige brug. Om de nieuwe landhoofden te kunnen bouwen onder de bestaande spoorlijn, moeten tijdelijke hulpbruggen worden geplaatst. Nadat de nieuwe stalen brug boven de snelweg is geplaatst, wordt het betonnen dek gestort en het ballastbed en alle spoorvoorzieningen aangebracht. In een buitendienststelling van een lang weekend wordt de oude brug gesloopt en de nieuwe brug (met een totaalgewicht van ± 15.000 ton) op een schuifbaan naar zijn definitieve positie verschoven. Het gevolg van deze methode is dat de brug een overspanningslengte van minimaal 255 m moet krijgen opdat de landhoofden van de nieuwe brug achter de bestaande landhoofden kunnen worden gebouwd. Vanwege de grote lengte in combinatie met de vereiste slankheid van de hoofdliggers en bogen worden deze vervaardigd uit S460.

Hierdoor kan het gewicht van de brug beperkt blijven en is het mogelijk om de brug over de snelweg te transporteren. De staalconstructie wordt in delen geprefabriceerd in België. Om de verkeershinder zoveel mogelijk te beperken, vindt het transport van de prefab delen naar de bouwplaats in de nacht plaats, zonder extra wegafsluitingen. Om dit mogelijk te maken, moet elk brugdeel passen in een envelop van $3 \times 4 \times 20$ m en niet meer wegen dan 100 ton. Alleen de booggeboortes worden vanwege hun gewicht en grootte via het water aangevoerd tot de Hollandse Brug en met een speciaal transport naar de bouwplaats gereden.

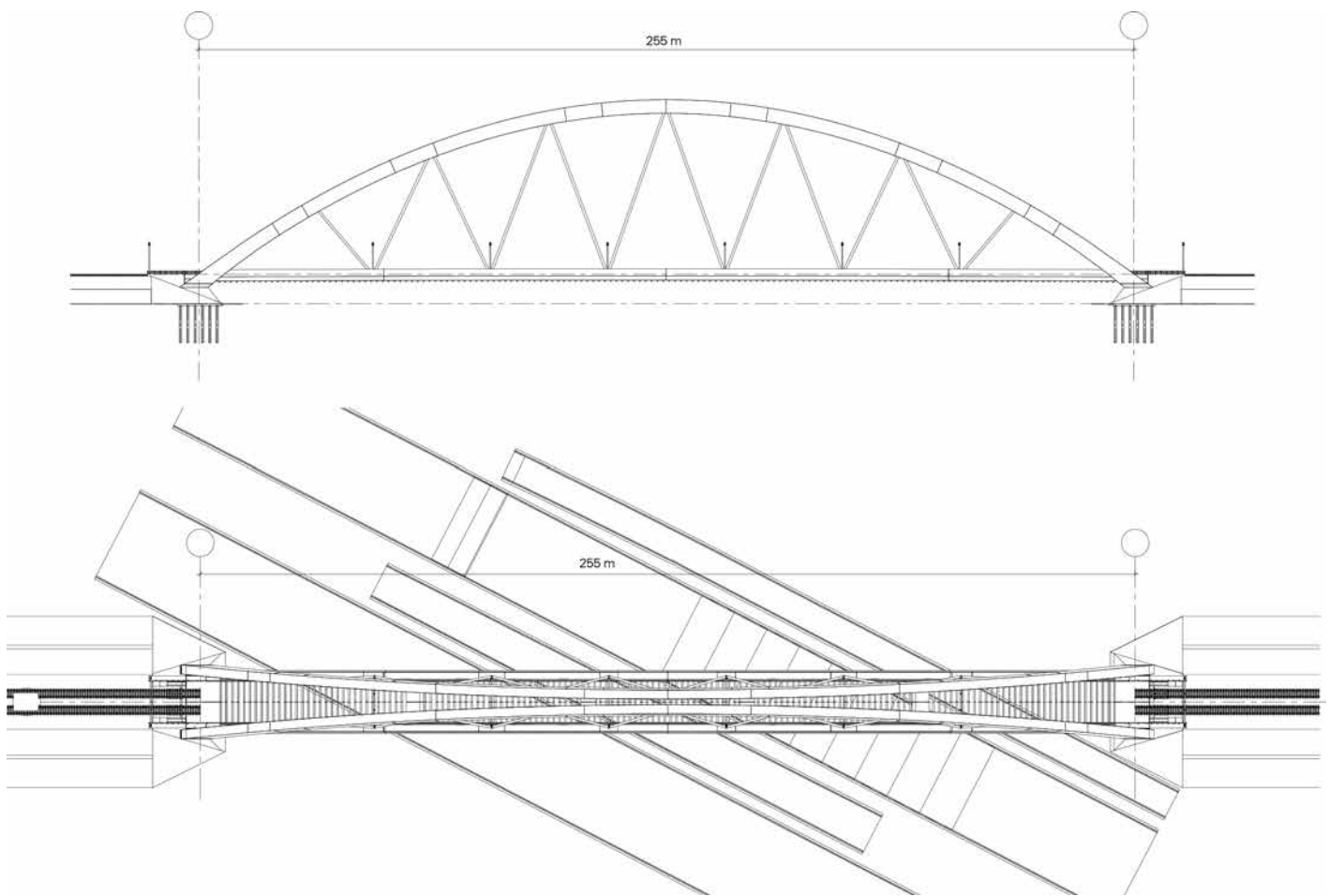
Geluidsafstraling

Omdat de brug direct naast een woongebied ligt, gelden strenge eisen aan de geluidafstraling van de brug. Mede daarom is besloten om de brug te voorzien van een geluiddempend staal-beton dek, met daarop een geluidsabsorberend ballastbed. Door de hoofdliggers ruim een meter boven het spoor uit te laten steken, wordt het luchtgeluid gedeeltelijk gereflecteerd. De buitenste lijfplaat van de hoofdliggers is geknikt, waardoor hinderlijke geluidfrequenties worden voorkomen. Om de effectiviteit van deze ontwerpkeuzen rekenkundig te onderbouwen, is reeds in de tenderfase adviesbureau Peutz betrokken. Op basis van FEM-berekeningen

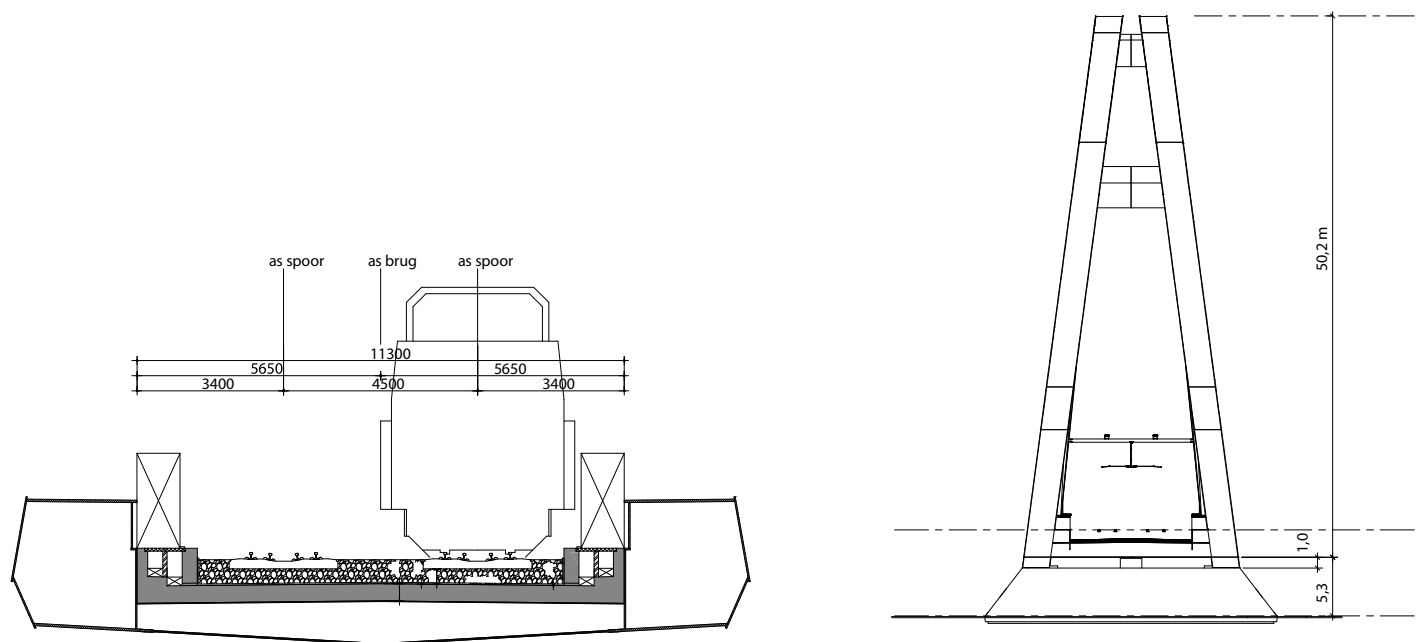
is de trillingresponsie en het afgestraald geluidvermogen van de brug bepaald. Voor de invoering van de trillingsexcitatie door treinpassages is een tweede FEM-model opgesteld op basis van een referentiebrug, de IJsselspoorbrug tussen Zwolle en Hattem waaraan bij verschillende treintypen trillingen en geluidmetingen zijn verricht. De berekeningen tonen aan dat de brug zich in theorie stiller zal gedragen dan vereist, een conclusie die later met geluidmetingen ook daadwerkelijk kan worden geverifieerd.

S460

Zoals eerder aangegeven is toepassing van S460 voor de hoofdliggers en bogen noodzakelijk. De keuze voor S355 in combinatie met de vereiste slankheid van de brug zou leiden tot ontoelaatbare plaatdiktes en een te hoog transportgewicht. Volgens de huidige ontwerprichtlijn van ProRail is het echter niet toegestaan om staalsoorten hoger dan S355 toe te passen. Redenen hiervoor zijn de wens voor het verkrijgen van een robuuster brugontwerp en het beperken van het risico op lasfouten tijdens fabricage- en herstelwerkzaamheden van de brug. Laatstgenoemde heeft geleid tot het gebruik van S355 voor de relatief aanrijdgevoelige dwarsdragers van het dek. In overleg met ProRail is besloten om voor een betere lasbaarheid thermomechanisch gewalst staal S460M/ML toe te



De overspanning wordt voornamelijk bepaald door het aantal kruisende rijstroken onder een hoek van 27°.



Ontwerp van het geluiddempend staal-beton dek met daarop een geluidsabsorberend ballastbed.



Samenstellen boogsecties.



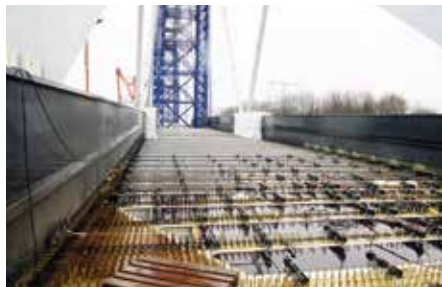
Binnenzijde boog.



Detail krachtsinleiding SPMT's (inrijden).



Fabricage booggeboortes.



Dek met deuvels en bekisting.



Diagonale hangerconfiguratie.

passen en om tegelijkertijd een aantal strengere eisen te stellen aan de chemische samenstelling en mechanische eigenschappen van het materiaal. Het resultaat is een voor alle partijen acceptabel ontwerp, zowel in technische als economische zin, met een gewichtsbesparing van bijna 30%.

Brand

Voor de brug wordt een brandwerendheid geëist van 30 minuten, conform de standaard brandkromme in de Eurocode. Voor de hoofddraagconstructie kan dit vanwege de relatief grote plaatdiktes rekenkundig worden aangetoond. Omdat dit voor de dwarsdragers onder het betondek een probleem blijkt te zijn, is in overleg met ProRail een probabilistische brandscenario-analyse uitgevoerd, waarbij realistische worst case-brandscenario's onder de brug zijn gesimuleerd en de opwarming van de constructieve elementen is bepaald na een specifieke brandduur. Voor het vaststellen van deze brandduur is rekening gehouden met realistische reactie- en opvolgsnelheden vanaf start brand tot aan het blussen van de brand en tot aan het tot stilstand brengen van het treinverkeer.

Boogbrug met diagonale hangers

De brug is uitgevoerd met een trekband in het brugdek. Voor de brug zijn enkele hangerconfiguraties in de tenderfase onderzocht: verticale hangers, diagonale hangers en een netwerkconfiguratie. De keuze van het type hangerconfiguratie heeft grote invloed op het ontwerp van een boogbrug. Omdat de vereiste stijfheid van de brug maatgevend is, leidt een diagonale hangerconfiguratie tot een optimaler ontwerp dan een verticale. Bovendien reduceert het zware gewicht van het dek

zelf de axiale drukkrachten in de diagonale hangers die veroorzaakt worden door ongunstige positie van treinen. Vanwege deze drukkrachten in de hangers zijn ze uitgevoerd als buizen met voldoende knikstabiliteit. Het toepassen van buizen heeft bovendien de voorkeur van staalbouwer Victor Buyck, omdat hiermee bouwtoelanties goed in de greep zijn te houden, zonder het eventueel moeten naspannen van hangerelementen.

Staal-beton brugdek

Het brugdek is opgebouwd uit twee hoofdliggers die, samen met het betondek, als trekband fungeren. Het betondek met een dikte van 40 cm is via deuvels verbonden met zowel de dwarsdragers als het binnenlijf van de hoofdliggers. Het betondek is dus onderdeel van de staal-beton werking van de dwarsdragers en wordt in die richting hoofdzakelijk op druk belast. De dwarsdragers liggen slechts 1,6 m uit elkaar, vanwege de beperkte beschikbare constructiehoogte tussen het profiel van vrije ruimte van de A1 en het vastgestelde alignement van het spoor. Omdat toepassing van S460 resulteert in een reductie van de trekstijfheid van de hoofdligger, wordt het betonnen dek in langsrichting meer op trek belast. Om te voldoen aan de toets op scheurwijdte is het noodzakelijk relatief veel wapening aan te brengen ($\pm 800 \text{ kg/m}^3$). Dit lijkt een groot nadeel, maar hier staat tegenover dat de hoofdliggers minder op trek worden belast. Wapeningsstaal in het betondek is in principe goedkoper dan het constructiestaal van de hoofdliggers. Ook moet gebruik worden gemaakt van lichter beton dat in de nacht in één keer gestort moet worden om de verhardingskrimpt te minimaliseren. In combinatie met geëxpandeerde kleikorrels, kunststof vezels, plastificeerders en

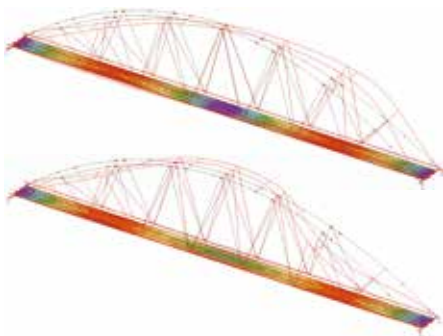
vertragers is het mogelijk gebleken om een betonmengsel samen te stellen met voldoende verwerkbaarheid in de beperkte ruimte tussen de wapening en de deuvels.

Luchtdichte kokers

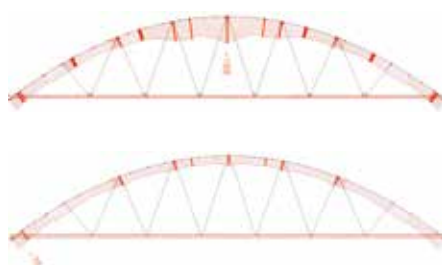
De hoofddraagconstructie is opgebouwd uit kokervormige doorsneden. De constructieve voordelen zijn een grote weerstand tegen torsie en buiging in twee richtingen. Een ander voordeel is dat de binnenzijde niet geconserveerd hoeft te worden als de ruimtes luchtdicht worden afgesloten. Dit betekent echter wel dat er een extra belastinggeval beschouwd moet worden: belasting door onder- en overdruk. Vanwege de voorvermoeding toegepast *save life*-ontwerpfactor zijn toekomstige inspecties in de kokerliggers niet noodzakelijk. Bovendien zijn de bogen zeer moeilijk doorgankelijk wat de veiligheid van onderhoudspersoneel niet ten goede komt. Om bij een eventuele aanrijding tegen de hoofdligger toch een inwendige inspectie te kunnen uitvoeren, zijn in de lijfplaten locaties opgenomen waar in een dunne plaat een gat kan worden gemaakt zonder verlies van constructieve integriteit.

Doorsneden hoofddraagconstructie

Vanuit de vormgeving is de wens om de koppelingen tussen de bogen op een zo hoog mogelijke positie te plaatsen. Hiermee is de globale stabiliteit van de bogen één van de meest kritische ontwerpaspecten van de brug. Tweede orde-effecten zijn beschouwd in de toetsing van de boogdoorsneden. De afmetingen van de boogdoorsnede zijn gebaseerd op de maximale transportafmetingen over de weg. Dit heeft geresulteerd in de hoogte van 3600 mm. Uit de globale stabiliteit volgt een optimale breedte van 2500 mm.



Vervorming 1e (boven) en 2e eigenwaarde.



Normaalspanning met en zonder bouwfasering.



Koppeling diagonaal-boog voorzien van trogvormige langsverstijvers en verstijvingsschotten.



Boogdoorsnede met mangaten en de boogkoppelingen op de achtergrond.

Bovendien is de lokale stabiliteit van de boogdoorsnedes kritisch mede vanwege de kromming van de flenzen. Een studie leidt tot een optimale doorsnede van de boogsecties met een zestel trogverstijvers. Door het toepassen van S460 en de relatief grote plaatafmetingen van de boogdoorsnede is ook de lokale stabiliteit in relatie tot de doorsnede-toetsing een belangrijke toetsing geweest. De flens- en lijfdiktes variëren over de lengte van de bogen, voornamelijk als resultaat van de optredende momenten. In het midden van de boog is de lijfdikte 25 mm en de flensdikte maximaal 100 mm bij de diagonaalaansluiting. Tussen de booggeboorte en de eerste boogkoppeling is de lijfdikte maximaal 50 mm en de flensdikte maximaal 75 mm. Over de hele lengte van de boog worden elke 3 tot 4 m dwarschotten aangebracht voor plooiestabiliteit en de afdracht van belastingen loodrecht op de plaatvelden (zoals onder- en overdruk). De flenzen zijn tussen de lijfplaten gelast voor een vlak zij-aanzicht.

Plaatdiktes

Bij het vaststellen van de constructiehoogte van de hoofdligger is rekening gehouden met het zicht van treinpassagiers. De optimale hoogte is bepaald op 3050 mm. De totale breedte bedraagt 2740 mm. Elke 10,5 m is een dwarschot toegepast om de belastingen vanuit de dwarsdragers in de hoofdligger in te leiden.

De plaatdikte-overgangen zijn excentrisch, zodat deze niet aan de buitenzijde zichtbaar zijn. Om lokale spanningstoenames te voorkomen zijn extra T-vormige dwarsverstijvers op de onderflens geplaatst. Voor de vermoeiingstoets zijn deze effecten, ondanks de aanwezigheid van het dwarschot, wel meegenomen.

De dwarsdragers hebben een lengte van 11,5 m en een constructiehoogte die varieert van 650 mm bij de aansluiting van de hoofdligger tot 1000 mm in het midden van de brug. Omdat de totale constructiehoogte van het staal-beton brugdek beperkt is, door de beschikbare ruimte tussen spoor en snelweg, is een hart-op-hart afstand van 1,6 m gekozen voor voldoende vermoeiingssterkte bij de aansluitingen met de hoofdliggers.



Voorste dwarsdragers.

De diagonalen van de brug zijn vervaardigd uit ronde buisprofielen S355. De diameter van de buisprofielen is 610 mm, omdat de diagonalen ook op druk kunnen worden belast bij een treinpassage. De wanddikte van 55 mm is gekozen om winddynamische redenen. Bij de gekozen buisdoorsnede is de diagonaal theoretisch niet gevoelig voor vortex-excitatie door Von Kármán-wervels (zie p. 34-38).

De koppelingen tussen de bogen hebben een belangrijke bijdrage in de globale stabiliteit van de bogen. Deze koppelingen zijn ook uitgevoerd als kokerligger, voorzien van trogvormige langsverstijvers. In de aansluitingen met de bogen zijn verstijvingsschotten aangebracht. De bereikbaarheid van de lasverbindingen, mede door de aanwezigheid van de trogverstijvingen in de boogdoorsnede, is een belangrijk aandachtspunt in de detaillering.

Opleggsysteem

De brug is in de hoekpunten verticaal ondersteund door vier gelijke bolsegment-opleggingen. De afmeting van het onderzadel bedraagt $\pm 1400 \times 1400$ mm. De brug is horizontaal gefixeerd door twee doken ($\pm 1800 \times 1800$ mm) die zich op beide landhoofden tussen de verticale opleggingen bevinden. Eén doek neemt krachten op in alle richtingen, de andere doek geeft enkel steun in dwarsrichting van de brug.

Berekeningsaanpak

Met een volledig staaftmodel, waarin het betondek met plaafelementen is gemodelleerd, zijn alle lineaire combinaties berekend. Hierin zijn de omhullende resultaten van de treinbelastingen meegenomen (de



Speciale voorzieningen voor laswerkzaamheden.

grootste waarden voor alle mogelijke belastingstanden van de trein voor alle doorsnedes), zodat alle maatgevende krachten voor met name de diagonalen berekend zijn. Voor de toetsing van de globale stabiliteit van de bogen zijn geometrisch niet-lineaire berekeningen met imperfectie uitgevoerd voor de combinatie met de grootste normaal drukkracht in de bogen. De boogimperfectie is bepaald met de twee kritische instabiliteitsvormen van de constructie.

De toetsing van de bogen is uitgevoerd voor een aantal doorsneden met de krachtsverdeling uit de verschillende niet-lineaire combinaties. Voor elke doorsnede zijn, voor het in rekening brengen van de lokale instabiliteitseffecten, de effectieve doorsnedes bepaald. De berekende effectieve spanningen zijn vervolgens verhoogd met de effecten van de bouwfasering, de gekromde flensplaat en onder- en overdruk in de doorsnede. De hoofd details zijn gemodelleerd in separate rekenmodellen. Er zijn drie hoofd details in verschillende modellen uitgewerkt: de booggeboorte (inclusief einddwarsdrager), de diagonaalaansluiting boog (inclusief boogkoppeling) en de diagonaalaansluiting hoofdligger. Alle details van de spoorbrug zijn getoetst op vermoeiing met de methode met equivalente schadefactor.

Invloed bouwfasering

De bouwmethode heeft een grote invloed op de uiteindelijke krachtsverdeling. De hoofdliggersecties zijn op de voorbouwlocatie op meerdere steunpunten opgelegd. De totale booglengthe wordt echter door slechts vier tussengeplaatste steunpunten ondersteund. De positie van deze hulpconstructies is bepaald door de meest optimale assemblagemethode.



Hulpconstructie voor inhijzen middelste boogsectie.

Er is gekozen om het middelste boogdeel van bijna 100 m en een gewicht van zo'n 1300 ton in te hijsen met strand jacks. Deze zijn gemonteerd op een uitkragende hulpconstructie die is gemonteerd op bovenzijde van de boogdoorsnede. De krachtsinleiding en plooi stabiliteit op de schuine lijfplaten van de boogdoorsnede is een belangrijk aandachtspunt in het uitvoeringsontwerp. De krachtsverdeling door de bouwmethode is berekend in een separaat rekenmodel, waarin de effecten van de bouwvolgorde op de krachtsverdeling bepaald zijn. De diagonalen zijn aangebracht nadat de boog- en hoofdliggerdelen aan elkaar zijn gelast. Hierdoor wordt het volledige eigengewicht van de montagedelen als buiging tussen de hulpconstructies overgedragen. Na het aflaten van de constructie worden de oorspronkelijke reactiekrachten uit de hulpconstructies door de hoofd draagconstructie naar de eindopleggingen afgedragen. Dit geeft voornamelijk een herverdeling van normaal krachten in de diagonalen.

De spanningsverdeling in de boog is bepaald met een rekenmodel met en zonder bouwfasering. Hieruit komt naar voren dat met name in het middendeel van de boog een grote spanningstoename door de bouwmethode ontstaat, resulterend in een maximale flensdikte van 100 mm. Er is onderzoek gedaan naar het overspannen van het in te hijsen middenboogdeel, echter de additionele kosten voor de hulpconstructies wegen niet op tegen het extra staal. Hierbij is ook het maximale inrijdgewicht van de brug in ogenschouw genomen.

Naast de invloed op de krachtverdeling is de bouwmethode ook bepalend voor de in rekening te brengen bouwzeeg. Daarbij gedraagt



Enkele diagonaal uit buisprofiel S355 van 55 mm dik voor winddynamica.



Tijdelijk landhoofd met voorzieningen voor inschuiven.

de brug zich na het uitharden van het betondek ook weer anders. Voor alle tussentijdse bouwfasen is de bouwzeeg bepaald en verwerkt in de samenstellingstekeningen voor fabricage.

Bouwtoleranties zijn vroeg in het proces meegenomen in het ontwerp. Vooral de beperkte ruimte op het landhoofd voor de opleggingen en vlijzelpunten maken dit belangrijk. Alle voorzieningen op de landhoofden, inclusief de schuifbanen voor het inschuiven, zijn ingestort nog voordat de assemblage van de stalen brug compleet is.

Dynamisch gedrag door spoorbelasting

Het dynamisch gedrag van een spoorbrug bij passage van treinen is een belangrijk aspect. Zowel in verticale als in horizontale richting kan het brugdek een grote versnelling ondergaan, waarbij niet wordt voldaan aan criteria met betrekking tot spoorveiligheid en passagierscomfort.

Een diagonale hangerconfiguratie resulteert in een zeer stijve brug, met een optredende maximale doorbuiging van $\pm L/3000$, waarmee kan worden aangetoond dat een dynamische berekening 'van verticaal gedrag' niet hoeft te worden uitgevoerd.

Het toetscriterium voor het horizontale dynamische gedrag staat in de Eurocode: de horizontale eigenfrequentie moet groter zijn dan 1,2 Hz. Spoorbruggen met een dergelijk grote overspanning hebben een horizontale

eigenfrequentie die beduidend lager ligt dan 1,2 Hz. Met ProRail is dit aspect besproken en is een beschouwing op basis van scenario's overeengekomen. Deze scenario's betreffen een onvolkomenheid in het spoor en het in beweging komen van de brug door een windvlaag tegen een passerende trein. De eigenschappen van de treinen, zoals massa's, veerwaardes en dempingswaardes, zijn moeilijk te verkrijgen. Er is besloten om twee representatieve treintypes aan te houden, namelijk een passagierstrein en een goederentrein. Het toetscriterium is gevonden in een Japans onderzoek, waarin een maximale horizontale versnelling van $0,5 \text{ m/s}^2$ voor toetsing op veiligheid (m.n. stabiliteit van het ballastbed) wordt geadviseerd. De dynamische berekeningen zijn uitgevoerd en de resultaten tonen aan dat de spoorveiligheid voldoende is geborgd.

Ontwerp diagonaalaansluiting

Er is gekozen voor een flexibele verbinding van de diagonalen aan de hoofdliggers en bogen om grote inklemmomenten bij de aansluitingen te voorkomen. De diagonalen zijn door de flens van de boog- en hoofdliggerdoorsnede gestoken, zodat een lokale gatverzwakking ontstaat. Dit is opgevangen door een lokaal dikkere flensplaat. Tevens wordt elke afzonderlijke diagonaal aan beide zijden slechts aan één dwarsschot verbonden. De inklemmingsmomenten bij vermoeiingsgevoelige locaties in de diagonaal-

aansluitingen worden zo beduidend lager vergeleken met een ingeklemde verbinding. Hiermee is een relatief eenvoudige oplossing gevonden, die ook nog goedkoper is in productie.

Consequentie is wel dat de beoogde ring, die moet zorgen voor de luchtdichtheid van de koker, een te stijf element in de verbinding wordt. De lassen zouden niet op vermoeiing voldoen. Om dit op te lossen is gezocht naar een duurzame en flexibele afdichting. Deze oplossing is gevonden in een 'hoedconstructie', die bestaat uit een dunwandige stalen ring en buisprofiel, die volledig gelast zijn, maar voldoende flexibiliteit hebben.

Ontwerp dwarsdrageraansluitingen

De dwarsdrageraansluiting is een belangrijk onderdeel. Het aansluitdetail wordt zwaar belast door spanningswisselingen uit treinpassages. De meest ideale aansluiting is een aansluiting die zich flexibel genoeg gedraagt om rotaties van de dwarsdragereindes te kunnen meemaken. Uit berekeningen volgt echter dat er hoge lokale spanningen in de lijfplaat zullen optreden. Daarom is aan de binnenzijde van de hoofdligger een gezette plaat toegepast, in lijn met de bovenflens van de dwarsdragereindes. De dwarsdragereindes zijn hierdoor ingeklemd op de hoofdliggers, maar de verbinding heeft een bepaalde rotatieveerstijfheid.

Voor het toetsen van de dwarsdrageraansluiting op vermoeiing, is een gedetailleerd



Hulpconstructie op de SPMT's met opleggingen onder de hoofdliggers.



Krachtsinleiding bij het vijzelen is opgenomen in het ontwerp.

model gebruikt, waarin een bepaalde lengte van het brugdek met schalen is gemodelleerd. Het betondek, inclusief verduveling aan de hoofdligger, is ingevoerd met volume-elementen. Daarnaast is voor het kritische vermoeiingsdetail een lokaal model gemaakt om de spanningsconcentratiefactoren te bepalen met de geometrische (hot spot) spanningsmethode.

Ontwerp booggeboorte

De booggeboorte is een complex detail, zowel voor het ontwerp als de fabricage. De bogen liggen namelijk niet in één lijn met de hoofdliggers en bovendien zijn de bogen iets geroteerd. Het ontwerp van de inwendige schotten van de booggeboorte is opgezet door het analyseren van de krachtsverdeling. Vervolgens is dit onderdeel volledig geanalyseerd met een uitgebreid FE-model, waarbij alle plaatdelen en lasverbindingen zijn gecontroleerd op sterkte, stabiliteit en vermoeiing. Tegelijkertijd is de bereikbaarheid van alle lasverbindingen onderzocht en zo nodig geoptimaliseerd. Intern zijn vele mangaten opgenomen voor bereikbaarheid tijdens fabricage.

Toetsing spoorbrug tijdens inrijden

Bij de gekozen uitvoeringsmethode van de spoorbrug moet de gehele staalconstructie op een zeker moment worden opgepakt door SPMT's voor het inrijden. Het totale bruggewicht en windbelasting bepalen het aantal

benodigde assen. De afmetingen van het landhoofd bepalen de positie van de SPMT's onder de brug. Het is niet mogelijk om de brug te ondersteunen onder de booggeboortes op de locatie van de definitieve opleggingen. Daarom is gekozen voor een hulpconstructie op de SPMT's met opleggingen onder de hoofdliggers. Dit resulteert in een krachtsverdeling waarbij de hoofdliggers door een groot buigend moment worden belast. Tijdens het ontwerpproces is al bepaald dat de toetsing voor deze situatie kritisch is, maar niet zal resulteren in een vergroting van de plaatdiktes. Intern zijn verticale schotten aangebracht om de krachten in te leiden in de hoofdliggerdoorsnede. Aangezien het niet mogelijk is om deze schotten na montage te verwijderen, blijven de schotten achter. De detaillering is zodanig dat dit geen nadelig effect heeft op de vermoeiingssterkte van de hoofdliggers. Uit het rekenmodel volgt tevens een grote drukkracht in de tweede diagonaal. Deze diagonalen zijn gestabiliseerd door een tijdelijke kniksteun in zowel dwars- als langsrichting.

Finale

Na een succesvolle nachtelijke inrijdoperatie wordt de brug op zijn tijdelijke landhoofden afgezet en kan de snelweg worden vrijgegeven voor verkeer. Terwijl direct daarna de afbouw van de brug kan plaatsvinden, kunnen auto's ongehinderd onder de brug door

rijden. Het betonnen dek wordt gestort en het ballastbed, spoorrails en bovenleiding worden aangebracht. Het bruggewicht bedraagt dan ruim 15.000 ton. Om de brug vervolgens op zijn definitieve landhoofden te schuiven is in het ontwerp van de brug rekening gehouden met de krachtsinleiding van de vijzels aan weerszijden van de sferische opleggingen. Ook hiervoor worden diverse versterkingen aangebracht in de booggeboorten. Nadat de bestaande betonnen brug in een lang weekend is gesloopt, kan de nieuwe spoorbrug 3 cm worden opgevijseld en vervolgens 20 m opzij worden geschoven over een roestvast stalen schuifbaanconstructie. Een paar dagen later rijdt de eerste trein over de brug en is de geboorte van de boogbrug een feit. •

Projectgegevens

Opdracht Rijkswaterstaat, Utrecht en ProRail, Utrecht
 • *Architectuur* ZJA Zwarts & Jansma Architecten, Amsterdam • *Constructief ontwerp* Iv-Infra, Haarlem • *Uitvoering* Bouwcombinatie SAAone (VolkerWessels, Vianen; Boskalis, Nieuw-Vennep; Hochtief, Essen (D) en DIF, Schiphol) • *Staalconstructie* Victor Buyck Steel Construction, Eeklo (B) • *Inrijdoperatie* Sarens, Amsterdam • *Inschuifoperatie* CT De Boer, Nieuwegein • *Advies geluidemissie* Peutz, Zoetermeer • *Fotografie* ehv, Rijkswaterstaat, Iv-Infra en Victor Buyck