

COMPLEXE AANSLUITING VAN SLANKE EN SCHEVE STRUCTUREN

Spoorbrug over het Van Starckenborghkanaal, Groningen

ir. S. M. den Blanken, projectmanager: ir. M. Zeenni

Met een nieuwe spoorbrug over het Van Starckenborghkanaal werden in de nok-van-Nederland twee vliegen in één klap geslagen. In het kader van de spoorverdubbeling tussen Groningen en Sauwerd wilde ProRail de bestaande brug, die aan het eind van zijn technische levensduur was, vervangen. 'En passant' zag Rijkswaterstaat haar wens in vervulling gaan om de doorvaarthoogte en breedte van het eronder liggende kanaal te vergroten. De brug zelf valt vooral op vanwege z'n scheve, 'uit het lood geslagen' ontwerp (figuur 1). Het plaatsen ervan - per boot - was een al even opvallend spektakel. In dit artikel wordt nader ingegaan op het ontwerp van de nieuwe brug en de berekeningswijze van de verbinding ervan met de betonnen middenpijlers.

De bestaande spoorbrug is een stalen vakwerkbrug voor enkelspoor, opgebouwd uit meerdere statisch bepaalde segmenten. De nieuwe spoorbrug is ontworpen als stalen boogbrug met een halfhooggelegen rijvloer met een middenoverspanning van 89 meter en twee ongelijke eindvelden van 28 en 36 meter. De oorsprong van de bogen is lager gelegen dan het rijdek, waardoor de primaire spatkrachten vanuit de boog gedeeltelijk

worden opgenomen door een inwendige trekband op gelijke hoogte met het rijdek. Ter plaatse van de aansluiting met de middenpijler wordt de boog gesteund door schoorpoten. De schoorpoten staan onder een hoek van 45° en zijn verbonden met de hoofdligger, waardoor een stijve driehoek ontstaat.

Zoals bij elke boog met een inwendige trekband ontstaat er een gecombineerde krachtwerving van buiging en normaalkracht doordat de trekband zal verlengen. Door deze buiging zal de brug een hoekverdraaiing ondergaan bij het snijpunt van de trekband met de boog. De stijve driehoek zal hierdoor tevens een gedwongen hoekverdraaiing ondergaan en het brugdek van de eindvelden optillen. Dit effect is niet te compenseren met een toename van de rustende belasting. In dit geval is gekozen voor de toepassing van een initiële vooruitbuiging van de ongelijke eindvelden van respectievelijk 340 en 370 mm, voorafgaand aan het plaatsen van de brug op haar steunpunten. Na het aflaten van de brug ontstaat er een verticale drukkracht op de eindopleggingen die ter compensatie dient voor de opwaartse verticale kracht.



Figuur 1: Aanzicht spoorbrug over het Van Starckenborghkanaal



Figuur 2: De scheefstand van de bogen in dwarsrichting

Verschoven bogen

De spoorbrug kruist het kanaal onder een hoek van 46° . In het ontwerp is door ARCADIS-architect Jaap van der Steeg gekozen voor een accentuering van deze scheve kruising door de bogen in lengterichting ook scheef ten opzichte van elkaar te plaatsen (figuur 2). De bogen zijn hierdoor 12,75 meter van elkaar verschoven en dat is precies gelijk aan de hangerafstand. Door deze verschuiving ontstaan er torsie- en wringspanningen in de staalconstructie. Door de toepassing van momentverbindingen in het rijdek en het weglaten van het stabiliteitsverband ontstaat er een vierendeelliger die wringing kan ondergaan en de momenten kan opnemen. En door de ongelijke stand van de bogen ontstaan ook ongelijke oplegreacties in langsrichting, waardoor de fundering zal willen verdraaien.

De bogen zijn in dwarsrichting naar elkaar toe gebogen. Op het niveau van het rijdek zouden beide bogen dus gekoppeld kunnen worden, waarbij deze koppeling dan wel scheef zou moeten worden geplaatst. Doordat alle langsliggers en dwarsdragers haaks zijn ontworpen, was er echter geen mogelijkheid deze verbinding te integreren op hetzelfde niveau als het rijdek. Uit esthetisch oogpunt bleek het niet wenselijk een 'scheve' trekverbinding tussen beide bogen onder het rijdek aan te brengen, reden waarom er is gekozen voor het opnemen van spatkracht in de betonnen funderingssloof. Gevolg daarvan is wel dat de verbinding tussen stalen brug en de betonnen onderbouw ook op deze spatkracht moest worden ontworpen.

Ondergrond

Ter plaatse van de spoorbrug over het Van Starcken-borgkanaal bestaat de ondergrond uit zeer slappe lagen. De draagkrachtige laag ligt op circa 50 meter beneden

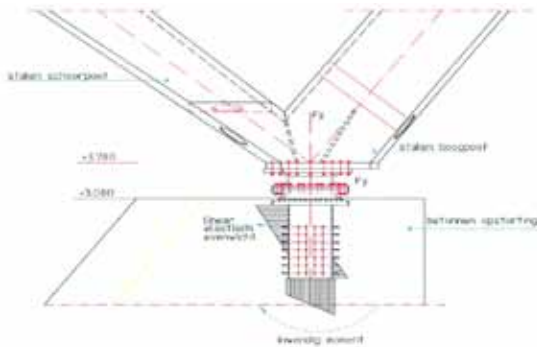
NAP. Omdat het toepassen van schoorpalen dan geen optie is, is gekozen voor een paalfundering met weinig palen en grote buisdiameters. De opname van de grote horizontaal krachten is gerealiseerd door de toepassing van momentvaste verbindingen tussen de paalkop en de fundering. De grote buisdiameters ($\text{Ø}1500$ mm) kunnen uitstekend hoge paalkopmomenten opnemen met traditionele kopwapening. Bijkomend negatief effect is de relatief grote vervormingen van de fundering. Hiervoor zijn aanvullende stabiliteitsschermen geplaatst die gekoppeld zijn aan de fundering van de middenpijler.

Oplegsysteem

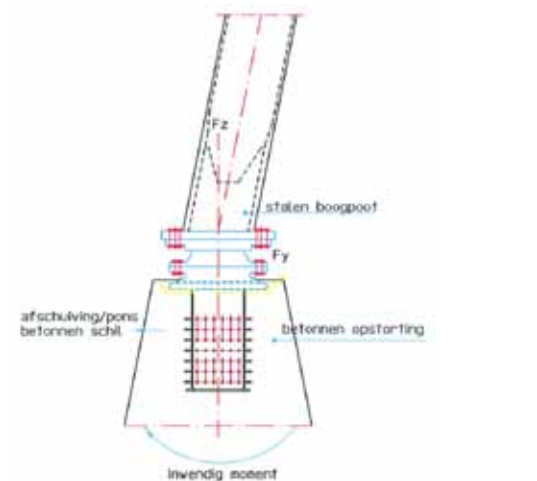
De horizontale krachten zijn verdeeld naar beide middenpijlers van de brug. Hierdoor ontstaat een oplegsysteem met vier oplegpunten van de boog, waarbij tevens een fixatie in x- en y-richting is toegepast. Ter plaatse van de eindopleggingen op de landhoofden zijn twee verticale opleggingen direct onder de beide sporen ontworpen en een fixatie in y-richting. Dit naar aanleiding van de zeer strenge eisen aan verschilverplaatsingen bij ingegoten spoorstaven ter plaatse van de overgang van de brug naar de aardebaan.

Opleggingen

In eerste instantie is gekeken naar standaard oplossingen waarbij de potoplegging door middel van traditionele voorspanbouten wordt verankerd in het beton. Na uitgebreide berekeningen bleek dat het opnemen van de slijt- en trekkrachten in de betonnen opstorten niet op een verantwoorde wijze kon worden gerealiseerd. De voorkeur ging vervolgens in eerste instantie uit naar een oplossing zonder voorspanbouten. Doordat de ge-



Figuur 3: Langsdoorsnede ontwerp staalbeton verbinding – lineair elastisch evenwicht



Figuur 4: Dwarsdoorsnede ontwerp staalbeton verbinding – afschuiving en pons



Figuur 5: De stalen doek met deuvels in nog niet voltooide wapeningskorf



Figuur 6: De brug op tijdelijke ondersteuning na het aflaten

hele oplegstoel vervangbaar dient te zijn, bleek het toepassen van bouten toch wenselijk. Het bovenzadel van de oplegstoel wordt door middel van voorspanbouten aan de brug bevestigd. Het onderzadel van de oplegstoel wordt ook door middel van voorspanbouten aan een stalen doek bevestigd, die in de betonnen opstorten zijn verankerd met deuvels. Omdat de huidige Nederlandse en Europese normen weinig houvast bieden voor de toetsing van een staalbetonverbinding die niet-standaard is, zijn eerst de bezwijk- en faalmechanismen in de uiterste en gebruikstoestand geanalyseerd en is vervolgens een literatuuronderzoek uitgevoerd naar gelijkwaardige verbindingen.

Lineair elastisch evenwicht

In een eerste controle zijn de driedimensionale (contact)spanningen geanalyseerd op basis van lineair elastisch evenwicht van de ingestorte stalen doek (zie figuur 3.). De gecombineerde verticaal en horizontaalkrachten leiden tevens tot hoge dwarskrachten en momenten in het beton die met buigtrekwapening en dwarskrachtwapening zijn opgenomen.

Scheurwijdtebeheersing en vervormingen

De scheurwijdte is gecontroleerd aan de hand van de spanningsverdeling in het beton en de wapening op basis van het lineair elastische evenwicht in de gebruiksfase. De vervormingen zijn globaal bekeken aan de hand van een M-N-Kappa diagram.

Lokale krachtsinleiding

De trekkracht vanuit het moment op de stalen doek wordt middels deuvels overgedragen op het beton. Vanuit de deuvels ontstaan drukdiagonalen die door middel van verticale buigtrekwapening wordt overgenomen en in het beton wordt geleid. Ook wordt aan de drukzijde aan de onderzijde van de doek een extra drukstrip geplaatst om de resterende druk geleidelijk in te leiden.

Afschuiving en pons

Met name in die situaties waarbij de verticale belasting minimaal, en de kracht op de doek in dwarse horizontale richting maximaal is, bestaat de kans op bezwijken door afschuiving of pons van de betonnen schil. In figuur 4 wordt deze situatie aangegeven, in de berekening is gebruik gemaakt van de algemene theorie betreffende afschuiving en is de controle op pons uitgevoerd.

Uitvoering staalbeton verbinding

Om de horizontale krachten op de verbinding te beperken is de verankering van de boogpoot aan de betonnen fundering pas gerealiseerd na het aflaten van de brug. Tijdens het aflaten van de brug, waarbij de eindopleggingen onder druk worden gebracht, ondergaan de schoorpoten namelijk een opgelegde beweging in langsrichting. Op figuur 5 is duidelijk te zien dat de stalen doek al is geplaatst in de betonnen opstort voorafgaand aan het storten.

Na het plaatsen van de stalen doek en de wapening is de betonnen schil gestort. Vervolgens is de brug afgelaten en gepositioneerd. Na het positioneren is de potoplegging geplaatst en zijn de stalen boog en de betonnen fundering aan elkaar verbonden door middel van het voorspannen van de bouten. Op figuur 6 is te zien dat de brug op tijdelijke ondersteuning is geplaatst, zodat de potoplegging kan worden gepositioneerd en gemonteerd. Het plaatsen van de brug was overigens een spektakel (en prestatie) op zich. Vanuit België, waar de vijf brugdelen zijn gemaakt, werden ze op speciale pontons richting Groningen gevaren, een reis die drie dagen in beslag nam. Tijdens de plaatsing raasde het treinverkeer gewoon door over de oude spoorbrug, eveneens een complicerende factor.

Dankzij de nieuwe brug is de baanvakcapaciteit verdubbeld en de doorvaarhoogte vergroot van zes naar negen meter en is het Starckenborghkanaal ter plaatse verbreed van 22 naar maar liefst 54 meter, waardoor er nu ook grote schepen met vier lagen containers kunnen passeren. Dit tot alle tevredenheid van ProRail, Rijkswaterstaat en niet te vergeten alle passanten (waaronder fietsers, voor wie op de brug ook ruimte is vrijgemaakt), die er een opvallend kunstwerk in het voor het overige vrij kale landschap hebben bij gekregen.