

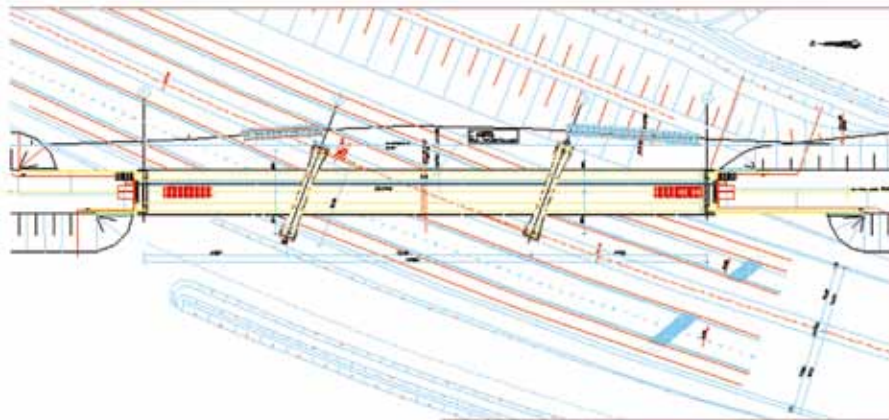
# HANGTROGBRUG TERNEUZEN TOONT: BETON EN STAAL GAAN GOED SAMEN

ing. M.J. Ossendrijver.

In Zeeuwsch Vlaanderen is op het kruispunt van de toegangsweg naar de Westerscheldetunnel en de goederenspoorlijn naar het industrieterrein Dow-Benelux een ongelijkvloerse kruising gerealiseerd in de vorm van een opvallende betonnen hangtrogbrug met stalen portalen. Het resultaat is een mooi voorbeeld van het ultiem benutten van de materialen beton en staal. Een bouwrichting met grote mogelijkheden.

De tunnel inclusief bijbehorende infrastructuur is gebouwd in opdracht van de NV Westerscheldetunnel, met het Rijk en de Provincie Zeeland als aandeelhouders. Omdat de wegen van en naar de tunnel het omliggende landschap beïnvloeden is de Dienst Landelijk Gebied (DLG) gevraagd dit landschap opnieuw in te richten. Voor de inpassing van de wegen waren twee uitgangspunten belangrijk: het behouden/ versterken van de verschillende landschapstypen en het zorgen voor een rustig wegbeeld door samenhang te creëren tussen alle elementen langs het tracé, zoals de tunnelinritten, viaducten en geluidsschermen. Om deze samenhang duidelijk te maken werden twee centrale thema's doorgevoerd die in alle elementen terugkomen, te weten de ronde vormen (in lijn met de geboorde tunnel) en de kleur zeegroen, conform het water van de Westerschelde.

vervolgens in opdracht van ProRail de mogelijkheden van een spoortrogbrug. Een betonnen trogbrug, waarbij de dragende balken vlak naast het spoor zijn gesitueerd en één geheel vormen met de rijvloer waarop de trein rijdt. Voordeel van een trogbrug is de geringe constructiehoogte bij relatief grote overspanningen. Hierdoor diende het spoor over een kleinere lengte te worden verhoogd en kon de spoorbaan weer sneller op de hoogte van de bestaande spoorbaan worden aangesloten. Door de kleine kruisingshoek bedraagt de totale lengte van de brug circa 124 m. Door het brede profiel van vrije ruimte van de toekomstige autosnelweg waren de traditionele plaatsingsmogelijkheden voor kolommen onder de balken van de trogbrug beperkt. Dit zou immers resulteren in (asymmetrische) overspanningen van 65 m. In het verleden door ARCADIS uitgevoerde verkennende berekeningen voor trogbruggen in het algemeen gaven echter aan dat de maximale overspanning voor trogbruggen (met spoor in ballast) ligt op circa 50 tot 55 m. Een oplossing werd gezocht in het plaatsen van kolommen naast de trogbrug, maar door de dan benodigde oplegbalk ( $h=2$  m) zou het spoor in dat geval hoger c.q. de weg lager moeten worden aangelegd. Een betere optie was de kolommen naast de trogbrug tot ver boven de trog door te zetten en de brug aan een bovenbalk op te hangen, waardoor de hoogte van het spoor noch de weg aangepast hoefden te worden (figuur 2). Door het toepassen van hangportalen kon bovendien een tussensteunpunt extra worden gecreëerd waardoor de maximale overspanning werd gereduceerd tot 52,4 m. Een overspanning, waarvan inmiddels is aangetoond dat die haalbaar is.



Figuur 1: Situatie hangtrogbrug

## Ontwerp en vormgeving

De toeleidende weg op Zeeuwsch Vlaanderen kruist de bestaande goederenspoorlijn van Sluiskil naar het industrieterrein Dow-Benelux onder een hoek van ongeveer  $21^\circ$  (figuur 1).

De spoorlijn ligt op een dijklichaam, circa 3 m. boven het maaiveld. Hierdoor lag het voor de hand de spoorlijn over de weg te voeren. Een tunnel viel om economische redenen af, zo wees een onderzoek van de Bouwdienst Rijkswaterstaat uit. ARCADIS onderzocht



Figuur 2: Zijaanzicht trogbrug

portalen opgehangen met behulp van twee groepen van drie hangkabels per portaal. Per groep van drie kabels is een veiligheidsfactor van 2,3 aangehouden. Dat betekent dat mocht er een kabel breken de kracht door de overige twee kabels wordt opgenomen met behoud van een veiligheidsfactor van 1,6. De tussen-steunpunten zijn zo gekozen dat ze de brug symmetrisch maken, zowel in lengterichting als in dwarsrichting. Met name de symmetrie in dwarsrichting (trogbrug in het hart van het portaal) is van essentieel belang voor de krachts-werking in de hangportalen. De portalen zijn gefundeerd op 40 m. lange Tubex-palen die trillingsvrij zijn aange-bracht. Een eveneens niet onbelangrijke factor was dat de trogbrug 10 m. uit de as van de bestaande spoorlijn gebouwd werd, waardoor de bouwactiviteiten zonder hinder van de treinexploitatie konden worden uitgevoerd.

De vormgeving van het kunstwerk is verzorgd door architect ir. J.A. van Belkum van ARCADIS. In samenwerking met onder andere het Buro Ruimte & Groen uit Borsele zorgde hij ervoor dat het ontwerp zo goed mogelijk voldoet aan de uitgangspunten zoals die waren vastgelegd in het landschapsplan en de architectuurnota voor het tracé Westerscheldetunnel.

### Staal & beton

Omdat voor de weggebruiker met name de achttien meter hoge hangportalen opvallende elementen in het landschap zouden worden, werd in plaats van verticale, massieve betonnen portalen met een horizontale bovenbalk gekozen voor slanke stalen boogconstructies in een doorgaande vloeiende lijn. De zijkant neigt hierbij naar binnen tot aan het profiel van vrije ruimte van de autosnelweg. Belangrijk punt was ook de stabiliteit van het portaal in de lengterichting van het spoor; reden om de uiteinden van de poten V-vormig te splitsen. In de richting loodrecht hierop was constructief weer een kleinere doorsnede mogelijk, zodat als totaal een krachtige, lenige vorm ontstond (figuur 3).

Uiteindelijk zijn hiermee portalen verkregen, die in een boogvormige constructie over de trogbrug heen werden geplaatst en zorgden voor een doorgaande beweging die in het landschap oprijst en weer terugzakt (figuur 4).

De vloeiende lijnen van de portalen zijn terug te vinden in de vorm van de trogbrug (figuur 5).

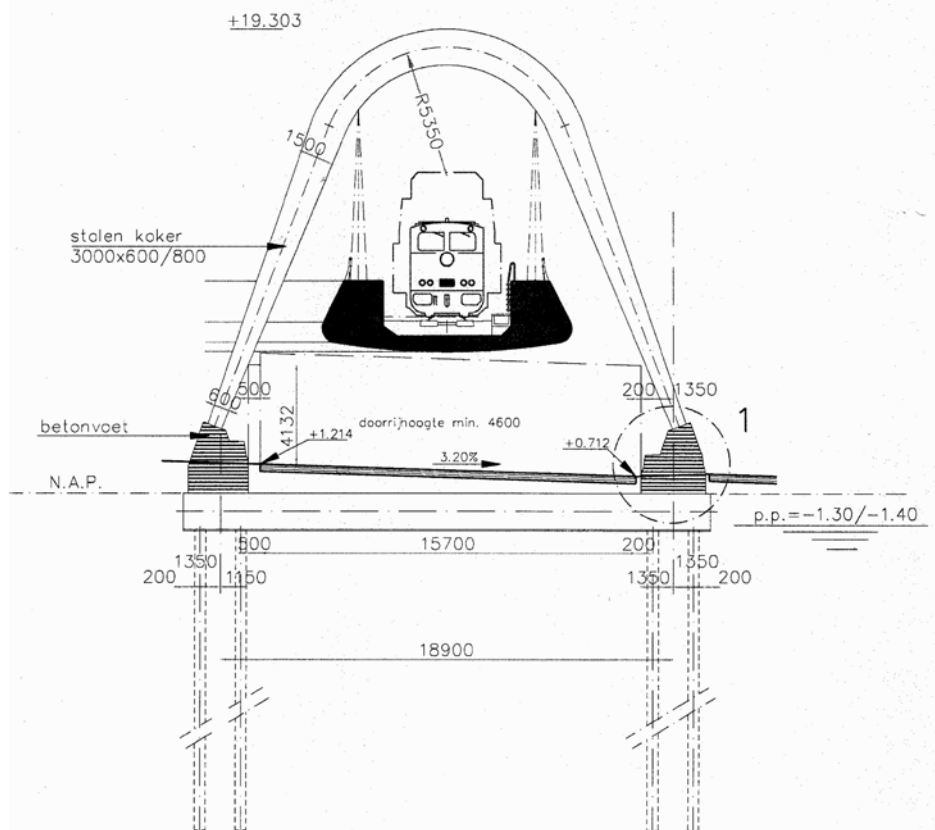
Belangrijk voor de trogbrug is dat de afgeronde vorm niet alleen de 'tubevorm' benadrukt, maar ook de spanning van de krachten in de enorme overspanning visueel voelbaar maken. Bovendien is door de tubevorm de opgehangen trogbrug een zelfstandiger, lossere element tussen de portalen geworden. De trogbrug start en landt in de landhoofden, die een extra accent krijgen door zowel het naar achter hellende voorvlak (figuur 6)



Figuur 3: Zijaanzicht stalen hangportaal



Figuur 4: Aanzicht loodrecht op stalen portaal



Figuur 5: Doorsnede in het vlak van het hangportaal

als de stalen vinnen aan de zijkant, die de ronde vorm van de brug nog even vasthouden en voortzetten (figuur 7). De trog wordt bovendien opgevangen in oplopende zijvleugels van de landhoofden.

Als detailuitwerking heeft de zijkant van de trogbrug een alternerende tegelstreep in twee tinten zeegroen gekregen en is op de landhoofden een rietvormige baanstructuur verdiept in de beton aangebracht. Interessant detailelement is ook de lichte draaiing van de hangkabels, die ontstaat door de schuine kruising van portaal en trogbrug.

### Constructieve aspecten

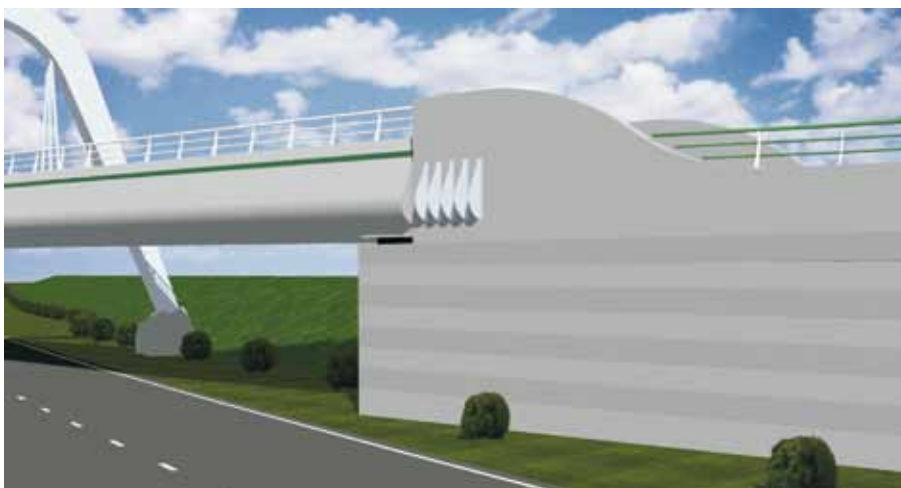
De ophanging van de trog met kabels aan schuin geplaatste stalen portalen is een bijzonderheid die in het constructief ontwerp van de brug de nodige aandacht vergde. In constructief kader is vooral gekeken naar achtereenvolgens het dynamisch gedrag van de trog onder treinbelasting en windbelasting; de dimensionering van de hangkabels en de bevestiging van de hangkabels aan de trog en tenslotte krachtafdracht via de portalen naar de ondergrond, waarbij grote spatkrachten optreden.

#### *Dynamisch gedrag onder treinbelasting*

Het op- en afrijden van treinen op de brug leidt tot plotselinge toe- en afname van de belastingen op de trog. Als gevolg hiervan zal de trog in trilling worden gebracht, waardoor de interne krachten in de trog groter kunnen worden dan uit een statische berekening volgt. De verhouding tussen de werkelijk optredende (dynamische) krachten en de statisch berekende krachten staat bekend als de Dynamic Load Factor. De waarde van deze factor hangt voornamelijk af van de massa van de trog; de buig- en torsiestijfheid van de trog; de stijfheid van de opleggingen en de snelheid en massa van de passerende trein. In de vigerende ontwerpvoorschriften is een dynamic load factor van 1,1 voorgeschreven. Gezien het bijzondere karakter van de constructie is de dynamic load factor voor dit ontwerp echter gecontroleerd met behulp van het eindige-elementen-



Figuur 6: Landhoofd

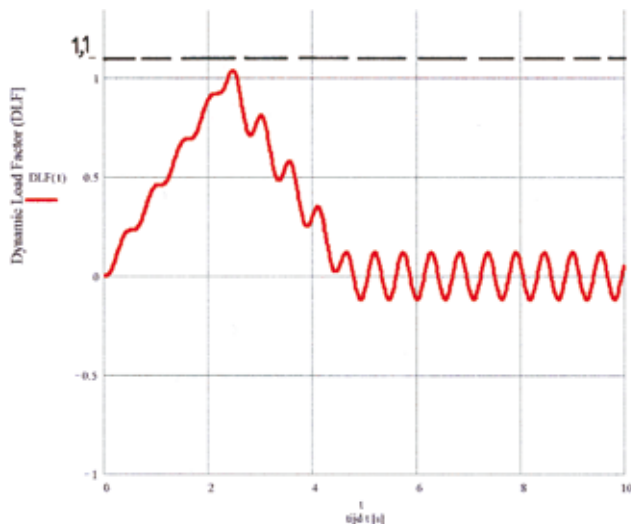


Figuur 7: Stalen vinnen op vleugelwand

programma ANSYS. Uit de berekening blijkt dat met een dynamic load factor van 1,1 de dynamische effecten van een passerende goederentrein voldoende zijn afgedekt (figuur 8).

#### *Dynamisch gedrag onder windbelasting*

De trog vormt een obstakel voor de wind. Als gevolg hiervan ontstaan rondom de brug wervels die na hun ontstaan loslaten van de brug. Het loslaten van de wervels gaat gepaard met drukvariaties die de brug belasten en leiden tot trillingen van het brugdek. Bij windsnelheden tot 50 km/h treedt voornamelijk verticale buiging van het brugdek op. Voor hogere windsnelheden kan bij dit type bruggen een verschijnsel optreden dat bekend staat als 'flutter': het optreden van torsietrillingen in combinatie met verticale buigtrillingen. Flutter treedt op wanneer het loslaten van wervels en de eigentruïling van de brug elkaar versterken. De windsnelheid waarbij dit plaatsvindt wordt de kritieke windsnelheid genoemd. De kritieke windsnelheid hangt af van de stroomlijning van de brug, de verhouding tussen buig- en torsiestijfheid van de trog en de massa en vorm van de brug. Door een juiste keuze van deze parameters werd bereikt dat de kritische windsnelheid hoger ligt dan de windsnelheid die ter plaatse kan optreden. Het ontwerp van de hangtrogbrug is gecontroleerd met behulp van ontwerpgrafieken waarmee de kritische windsnelheid werd bepaald. Hieruit bleek dat de kritieke windsnelheid hoger lag dan 200 km/h waarmee flutter kan worden uitgesloten. (figuur 9)



Figuur 8: grafische voorstelling van de dynamic load factor

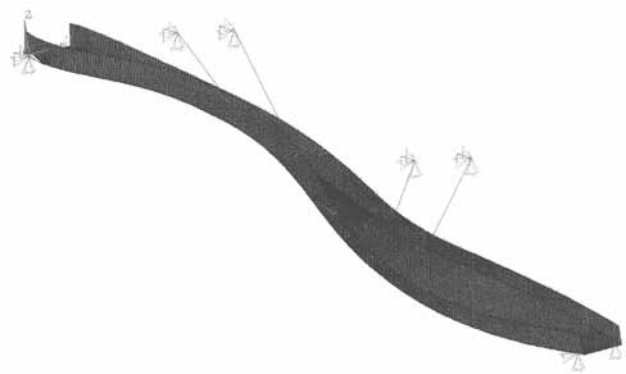


Figuur 10: De stalen doorvoeren in de trogbalk

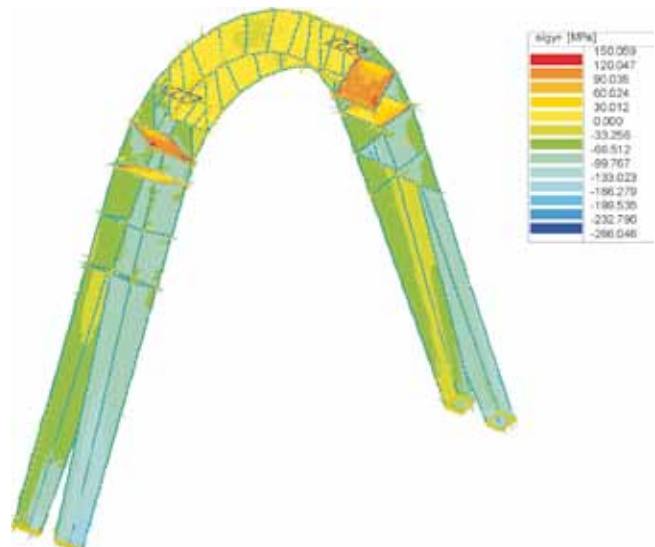
#### Dimensionering hangkabels en bevestiging

De belastingen als gevolg van de trein en het eigen gewicht van de trog worden via hangkabels afgedragen naar de stalen portalen. Ieder ophangpunt bestaat uit drie kabels (twee ophangpunten per portaal). De kabels dienen voor het afdragen van de krachten naar de portalen (uiterste grenstoestand) en het beperken van de vervorming van de trog (bruikbaarheidsgrenstoestand). Door de kabels te gebruiken ter beperking van de optredende doorbuiging kon de trog zelf minder stijf worden gedimensioneerd. Tegelijkertijd werden daarmee wel stijfheidseisen opgelegd aan de hangkabels. Het bleek dat de bruikbaarheidsgrenstoestand maatgevend was voor de dimensionering van de kabels. In de uiterste grenstoestand hebben de kabels een veiligheid van 2,3 tegen bezwijken.

De kabels en de bevestiging aan de trog staan bloot aan relatief grote belastingwisselingen, waardoor een controle op vermoeiing nodig is. De bevestiging van de kabels aan de trog is zodanig gedetailleerd dat de spanning in de kabel gelijkmatig wordt overgedragen aan de trog. Hierdoor worden de piekspanningen beperkt en is de weerstand tegen vermoeiing voldoende groot. De vermoeiingssterkte van de kabels ligt hoger dan de vermoeiingssterkte van de bevestiging (figuur 10).



Figuur 9: torsie-eigentrillingsvorm



Figuur 11: Spanningspatroon in het stalen portaal



Figuur 12: Bouw van de Hangtrogbrug

#### Dimensionering van de portalen

Via de kabels wordt de belasting ingeleid in de portalen. De portalen zelf zijn kokervormige constructies opgebouwd uit staalplaat. De kokers zijn inwendig verstijfd en ter plaatse van de ophanging van de kabels versterkt. Als gevolg van de belastingen worden de portalen op druk belast (figuur 11).

De portalen rusten op betonnen poeren. De benen van de portalen zijn schuin geplaatst. Deze schuine stand, in combinatie met de drukkracht in de portalen, leidt tot een spatkracht van 6000 kN die in de poeren wordt opgenomen. De fundering van de poeren is niet in staat om deze kracht op te nemen. In plaats daarvan zijn de poeren aan elkaar gekoppeld met een balk in voorgespannen beton, die de spatkracht opneemt. Daarmee is het evenwicht van het portaal verzekerd.

Al met al tal van inventieve en fraai ogende oplossingen voor een 'simplele' spoorwegkruising!