

Nr.4 Jaargang 27
december 2019

Bruggen



Symposium Fiets+Voetbruggen

Inhoud



- 4 **FIETSOSTRADES EN
FIETSBRUGGEN:
HET SUCCESRECEPT OM MEER
MENSEN VLOT EN VEILIG OP DE
FIETS TE ZETTEN**



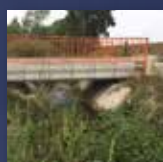
- 10 **PODIUMBRUG, AANJAGER VAN EEN
GEBIEDSTRANSFORMATIE**



- 16 **EERSTE BEWEEGBARE
BIOCOMPOSITIEBRUG IN
OPENBAAR WEGENNET
FRYSLÂN PRIMEUR!**



- 22 **CONSTRUCTIEF ONTWERP PRINS
CLAUSBRUG DORDRECHT**



- 30 **BY PARAMETRISCHE OPZET
3DPB-BRUG**



- 34 **BY ST PHILIPS
FIETS+VOETGANGERSBRUG IN
BRISTOL**



- 37 **BY TERUGBLIK EXCURSIE
ERASMUSBRUG**



- 39 **STREMMING
HEFBRUG BOSKOOP**

COLOFON

De Bruggenstichting is een onafhankelijk kenniscentrum dat zich richt op het vastleggen en uitdragen van kennis over bruggen

Opgericht 10 april 1992

REDACTIE

Jan Arends, Michel Bakker, Elisabeth van Blankenstein, Fred van Geest, Thijmen Jaspers Focks, Frans Remery, Heico de Lange, Wils van Soldt en Pieter Spits.

BESTUUR

Jan de Boer, Bert Hesselink, Gert-Jan Luijendijk, Dick Schaafsma, Peter Vijn, Beate Vlaanderen en Fred Westenberg (voorzitter).

DIRECTEUR

Harm Telder

RAAD VAN ADVIES

Arup Nederland, DIVV Amsterdam, FiberCore, IV-Infra, Janson Bridging, Mobilis TBI Infra, Movares, ProRail, Rijkswaterstaat, Vereniging SNS Staalbouw, Ingenieursbureau Westenberg.

BRUGGEN

Het tijdschrift BRUGGEN verschijnt vier maal per jaar.

Abonnement € 39,50 per jaar. Gratis voor begunstigers van de Nederlandse Bruggenstichting.

Losse nummers: € 12,50, te bestellen via NL82 INGB 0000 0589 75

KOPIJ

Ingezonden bijdragen worden alleen in behandeling genomen als zij digitaal worden aangeleverd. Alle bijdragen dienen voorzien te zijn van naam, adres en telefoonnummer van de inzender. Inzendingen kunnen zonder opgaaf van redenen worden geweigerd.

ADVERTENTIES

Heico de Lange (uitgever),
heico.de.lange@rws.nl of 088 – 7970727

REDACTIEADRES

Nederlandse Bruggenstichting, Lange Kleiweg 34,
2288 GK Rijswijk
Tel: 088 7970727
e-mail: redactie@bruggenstichting.nl
<https://twitter.com/bruggenst>

HOOFDREDACTEUR

Fred van Geest, Annaplaats 1, 2713 AK Zoetermeer,
Tel: 0623 229 836. E-mail: redactie@bruggenstichting.nl

WEBSITE

<http://www.bruggenstichting.nl>

GRAFISCHE VORMGEVING

Ronald Boiten en Irene Mesu, Amersfoort

OMSLAGFOTO VOORZIJDE

Composietbrug over de sporen op de F11

OMSLAGFOTO ACHTERZIJDE

Brug in het Kistofosmuseum. Foto: Hélène Binet

OPLAGE

1000

ISSN 1571-4586

VAN DE REDACTIE

FRED VAN GEEST

En weer ging het bijna mis met een onveilige situatie van een brug op leeftijd: onverwacht werd de hefbrug over de Gouwe bij Boskoop per direct afgesloten en moest de onderhoudsaannemer, die kennelijk paraat stond, direct aan de slag. Ik ben nieuwsgierig hoe het monitoren van de bestaande bruggenvoorraad en het onderhoud bij de brugeigenaren geregeld is. Mooi onderwerp voor een artikel in een volgend nummer.

Het symposium voor Fiets*Voetgangers-bruggen heeft traditiegetrouw plaatsgevonden in Amersfoort. Een uitstekende prestatie van het organisatiecomité, dat maar weer voor een goed lezingenprogramma heeft

gezorgd. In dit nummer zijn vier artikelen van dit symposium opgenomen met veel aandacht voor moderne materialen als weervaststaal, VVK en biocomposiet.

Soms ontsnapt tijdens de opmaak van het blad wel eens iets aan de aandacht of worden we naderhand gewezen op feitelijke onjuistheden. Het is goed te weten, dat als er iets hersteld moet worden, dit altijd gedaan wordt in de digitale versie van het blad. Na twee jaar staan die afleveringen dan op onze website, vrij toegankelijk. Kijk maar eens op bruggenstichting.nl > tijdschrift > inhoud bruggen, klik in het popup-scherm de betreffende jaargang aan en ga dan naar het gewenste nummer van dat jaar. Van recentere uitgaven zijn uittreksels beschikbaar. Soms zijn de omissies van dien aard dat daaraan in het volgende nummer aandacht

moet worden besteed. Een voorbeeld daarvan is het niet vermelden van de auteur Geri van Iterssum bij het artikel De Calandbrug uit het septembernummer. Onze welgemeende excuses hiervoor!

De redactie wenst onze lezers een – in goede gezondheid – overbrugbaar jaar 2020 toe!



BRUG: KUNSTWERK EN MUSEUM TEGELIJK!!

In de bossen ten noorden van Oslo bevindt zich het Kistefos Museum rondom een voormalige papiermolen. Het museum omvat een sculpturenpark dat door de rivier de



Foto: Laurean Ghinitoiu

Randselva in tweeën wordt gedeeld. De brug vormt niet alleen de verbinding tussen de museumgedeelten, maar bevat zelf ook 1000 m² aan expositieruimte. De brug, niet onverwacht 'de Twist' genoemd, is een ontwerp van Deense Architectenbureau BIG van Bjarke Ingels. Geen onbekende in Nederland, want hij is ook de ontwerper van het in aanbouw zijnde Sluishuis in Amsterdam, tussen het Centrum en IJburg over het IJ.

De vorm van de Kistefosbrug doet denken aan een grote stapel gedraaide boeken. Naast dat het spectaculair oogt, heeft de draai ook een functie: het overbrugt het verschil in hoogteligging van de beide oevers van de Randselva.

Door de draaiing in het gebouw heb je het idee, wanneer je door/over de brug loopt, dat je door het diafragma- en de sluitmechanisme van een enorme camera loopt.



Foto: Hélène Binet

BEGUNSTIGER

Belangstellenden voor het werk van de Bruggenstichting kunnen begunstiger worden, als particulier of als bedrijf/organisatie. U ontvangt dan viermaal per jaar het tijdschrift *BRUGGEN*. Begunstigers en donateurs kunnen advies krijgen van de Bruggenstichting en ontvangen korting op onze activiteiten en boekuitgaven.

De Bruggenstichting is door de Belastingdienst erkend als ANBI, wat staat voor Algemeen Nut Beogende Instelling. De minimumbijdrage voor particulieren is € 39,50 (incl. BTW) en voor bedrijven en instellingen vanaf € 135,- per jaar (excl. btw), zzp'ers € 70,- (excl. btw). Studenten betalen € 10,- (maximaal 2 jaar). U kunt zich aanmelden door het overmaken van de bijdrage op: IBAN NL82 INGB 0000 0589 75 t.n.v. de Nederlandse Bruggenstichting te Rijswijk.

Aanmelden is ook mogelijk via de website www.bruggenstichting.nl > begunstiger worden.



FIETSOSTRADES EN FIETSBRUGGEN

HET SUCCESRECEPT OM MEER MENSEN VLOT EN VEILIG OP DE FIETS TE ZETTEN

Sara Van Elsacker | Provincie Antwerpen (B)

De provincie Antwerpen maakt de laatste 10 jaar een echte schaa sprong in de realisatie van het fietssnelwegennetwerk. Toen de provincie Antwerpen in 2008 startte met de aanleg van een eerste fietssnelweg ('fietsostrade') op haar grondgebied, was de aanleg van een drie meter breed dubbelrichtingsfietspad nog zeer ambitieus. Er werd voornamelijk gekeken welke delen ontbraken op een bepaald traject, waarna op die delen een fietspad werd aangelegd. Fietsbruggen of fietstunnels waren echte unicums.

De eerste fietssnelweg werd een groot succes en trok snel meer fietsers aan. Die vroegen niet alleen een comfortabelere wegbreedte, maar ook betere oplossingen voor kruispunten. De provincie Antwerpen schakelde daarom een versnelling hoger: we zochten een totaaloplossing voor elke fietsostrade. De basiselementen van deze nieuwe fietsostrades zijn: een fietsvriendelijke breedte van 4,5 meter en het ontvlechten van verkeers- en fietsstromen door de aanleg van tunnels en bruggen.

De provincie Antwerpen heeft ondertussen een heus fietsteam uitgebouwd dat over een grote expertise en ervaring beschikt. Eigen project- en werfleiders worden in het ontwerp bijgestaan door gespecialiseerde studiebureaus. Het ontwerpen van een fietsbrug vergt heel wat keuzes. Aan welke eisen en randvoorwaarden moet een ontwerp voldoen?

De partner die de spoor-, water- of verkeersweg beheert, bepaalt ook de belangrijkste technische eisen en randvoorwaarden. In de vertaling van deze randvoorwaarden en eisen naar een ontwerp, voegt de provincie Antwerpen een hoge fietsambitie toe: voldoende breedte, comfortabele hellingen en bochten, goede zichtbaarheid, verlichting en een stroef wegdek met een hoge vlakheidsnorm.

Naast de technische eisen en randvoorwaarden is het kostenplaatje een belangrijke factor in de keuze van het ontwerp en het materiaal van de fietsbrug. Dat kostenplaatje bekijk je over een volledige levensduur: soort materiaal, transport- en onderhoudskosten, kosten van bijhorende infrastructuur (bijv. landhoofden), levensduur.

Een andere belangrijke parameter is het comfort voor de fietsers. De keuze voor een bepaald materiaal kan het aantal te overwinnen hoogtemeters verminderen, de rolweerstand verbeteren en zorgen dat het wegdek voldoende stroef is bij regen, ijzel of sneeuw.

De provincie zet steeds meer in op duurzaamheid. Ook die parameter wordt meegenomen in de afweging. Hoe worden de materialen geproduceerd? Waaruit bestaan ze? Hoe lang gaan ze mee? Wat is de impact van het onderhoud in de toekomst?

Afhankelijk van de situatie, de omgeving, de diverse afwegingen, de randvoorwaarden en eisen van de partners, kiest de provincie Antwerpen voor een uitvoering in kunststof, staal of beton.



COMPOSITBRUG OVER DE SPOREN OP DE F11

Deze composietbrug over de spoorlijn omvat de grootste vrije overspanning (26,6 meter) in Vlaanderen. Zij maakt deel uit van de F11, de fietssnelweg Antwerpen-Lier.

De toepassing van glasvezelversterkte fietsbruggen is in Vlaanderen nog niet ingeburgerd of genormeerd. Zij zijn daarom nog relatief onbekend bij opdrachtgevers. Voor de normering in Vlaanderen loopt er een project bij de Universiteit Gent (C-Bridge). Intussen maakt het ontbreken van goede voorbeelden en toepassingen het voor veel overheden moeilijk om een goed aanbestedingsdossier voor te bereiden. Daardoor wagen weinig overheden zich aan kunststofbruggen, ondanks alle voordelen van het materiaal.

Spoorbeheerder Infrabel vroeg om een innovatieve brugoplossing, die aan alle eisen en randvoorwaarden voldoet. Zo kwam het projectteam bij kunststof uit:

"We kozen om verschillende redenen op deze locatie voor een glasvezelversterkte kunststofbrug. De lange levensduur en dus ook de duurzaamheid, waren de belangrijkste." Omdat de brug na de bouw overgedragen wordt aan het gemeentebestuur, zijn de onderhouds- en beheerskosten bepalende factoren in de materiaalkeuze. Een stalen brug moet regelmatig een dikke verf krijgen. Dit is niet alleen een dure kwestie. Dit werkje kan ook alleen gebeuren als er geen treinen rijden.

Voor de spoorbeheerder is de minimale impact op de dienstregelingen van de treinen een belangrijk factor. De keuze voor kunststof speelt daar mooi op in. Dankzij het lichte materiaal en de inklemming tussen de landhoofden, kan men het brugdek zeer slank houden. Dat scheelt in de hoogtemeters en in de lengte van de aanloophellingen naar de brug.

Deze 30 meter lange en 5 meter brede brug werd in amper twee maanden tijd geproduceerd. De brug reisde in één keer via een uitzonderlijk wegtransport van de

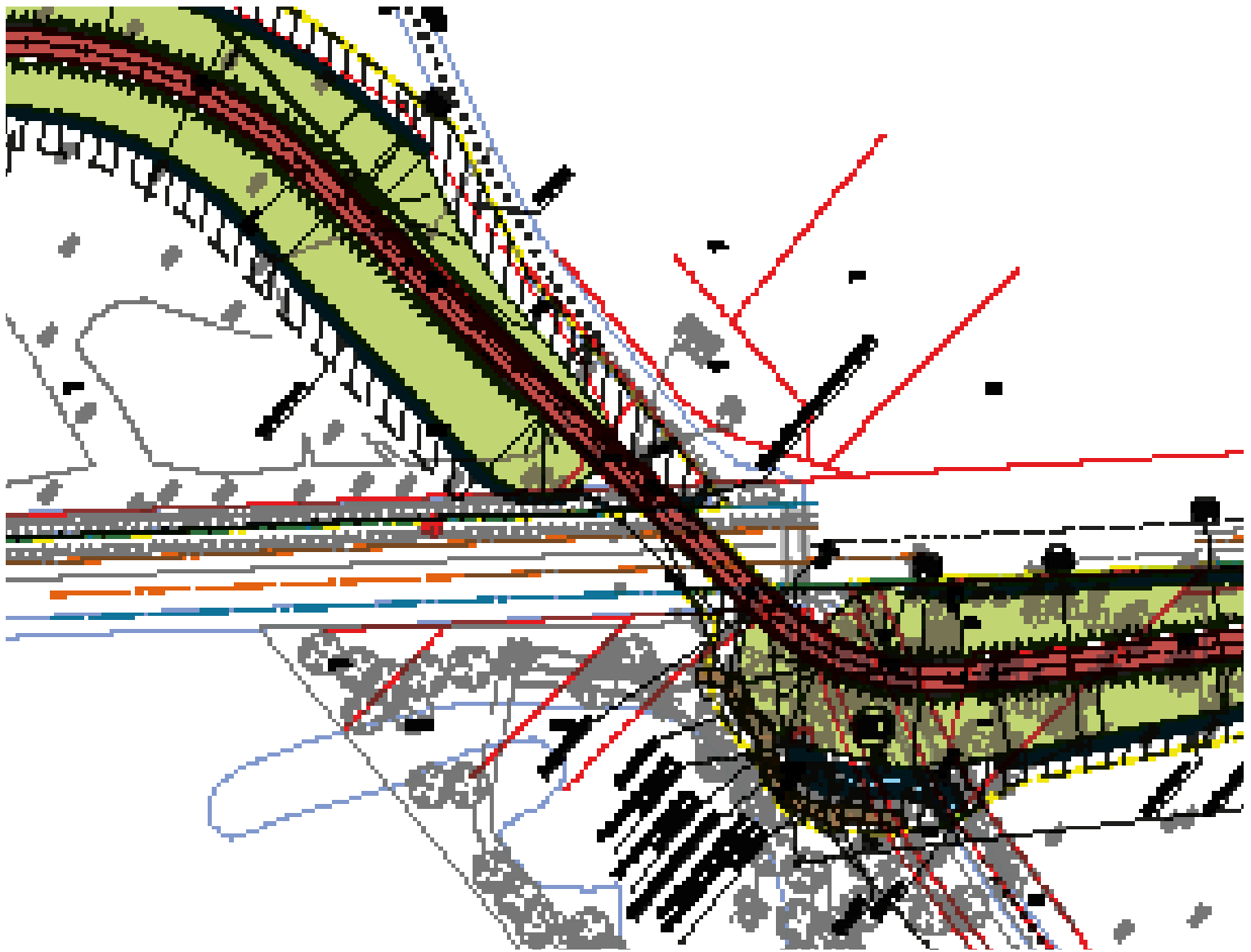
productiehal naar de bestemming. Zo werd eventuele hinder voor omwonenden en omgeving tot het minimum beperkt.

Voor de plaatsing van de brug, moest het spoorverkeer stilgelegd worden. Een actie die vier maanden vooraf aangevraagd en georganiseerd moest worden. Voor het plaatsen van de kraan en het inhijzen van de brug had de aannemer slechts 24 uren tijd. Weersomstandigheden vergrootten de uitdaging, omdat veel wind en regen de operatie konden dwarsbomen.

Inhijzen composietbrug in de F11



De eerste fietssnelweg werd een groot succes en trok snel meer fietsers aan



Het verloop van de F11 in bovenaanzicht

Dankzij een goede samenwerking tussen overheid (provincie Antwerpen), studiebureau (Arcadis), hoofdaannemer (Franki Construct), onderaannemer (Janson Bridging) en producent (Composite Structures) werd dit een succesvol project.

De brug kostte € 2.065.000. De provincie Antwerpen financierde hiervan € 433.000, Vlaanderen € 800.000 en Europa droeg via EFRO- structuurfondsen € 832.000 bij.



FIETSBRUG OVER HET KEMPISCH KANAAL OP DE F105

Deze fietsbrug maakt deel uit van de fietssnelweg Herentals-Leopoldsburg (F105). Zij verbindt Herentals met Olen, over het kanaal Bocholt-Herentals. De F105 loopt van het station van Herentals naar Balen langs spoorlijn 15. Goed voor 36 kilometer fietssplezier! Herentals is het knooppunt van vijf fietsostrades: de F5 Antwerpen-Hasselt, F105 Herentals-Leopoldsburg, F106 Aarschot-Herentals, F103 Lier-Herentals en de F102 Herentals-Turnhout. De NV De Vlaamse Waterweg beheert het Albertkanaal. Zij verhoogde de laatste 10 jaar alle bruggen. Vanuit haar expertise en randvoorwaarden werd gezocht naar de meest ideale brugoplossing, die ook aan de hoge verwachtingen van de fietser zou voldoen.

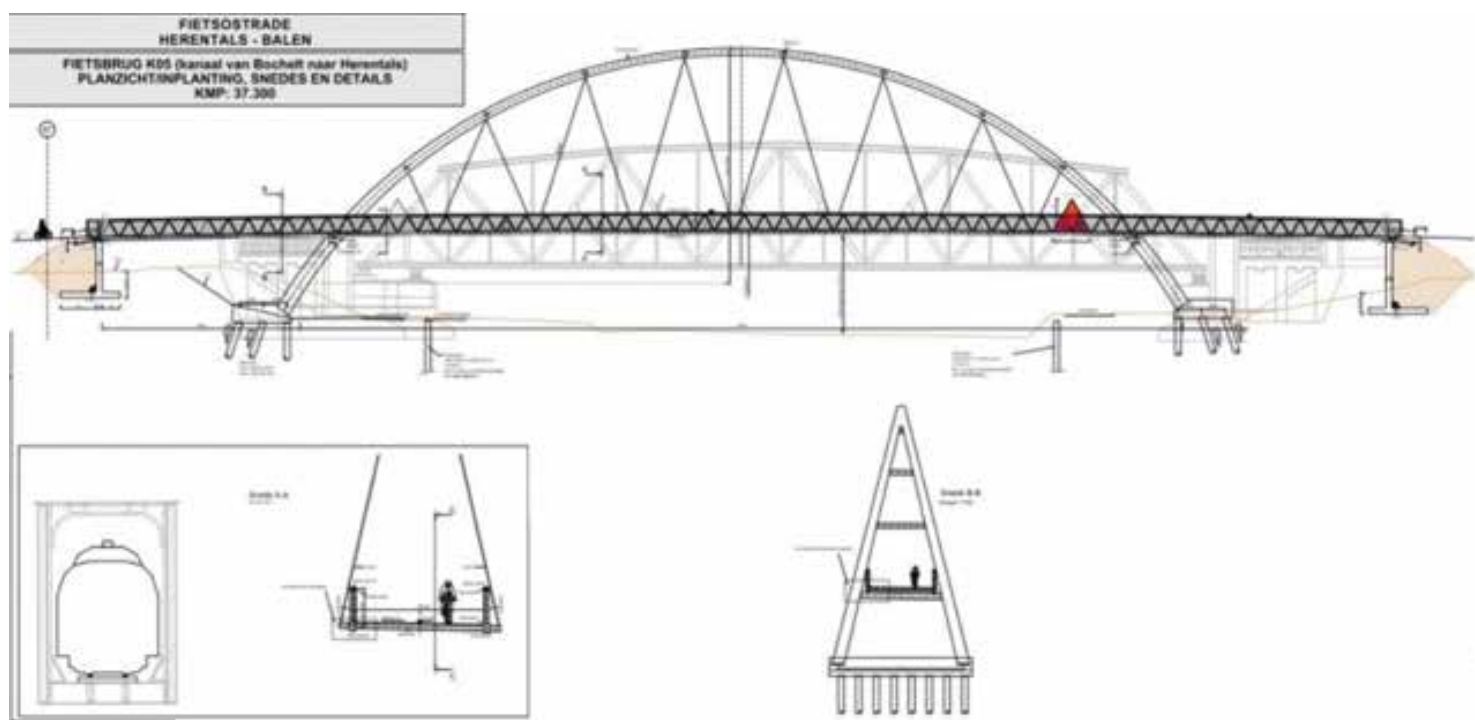
Die ideale oplossing bleek een soortgelijke brug te zijn zoals die over het Albertkanaal werden gebouwd. Het concept, een stalen boogbrug, had zichzelf meermaals bewezen. Het is een open ontwerp, waardoor de fietser kan genieten van de omgeving. De brugleuning bevat duurzame LED-verlichting.

De brug is 105 meter lang. Zij overspant het kanaal en de jaagpaden aan weerszijden ervan. Met haar 22,5 meter hoge bogen vormt ze een nieuwe landmark in de omgeving. Met haar breedte van 5,5 meter biedt ze veel fietscomfort. De brug ligt 8,30 meter boven het water waardoor ze de scheepvaart niet belemmert. De constructie zelf weegt 265 ton en wordt gedragen door vier ondersteuning die elk bestaan uit 100 funderingspalen, meer dan 470 m³ beton en 60 ton wapening.

De brug werd na aanvoer van de verschillende weggedelen en de boogdelen in amper drie dagen geassembleerd op de werf. Om deze constructie ter plaatse te krijgen, benutten we met plezier de ondergelegen waterweg. Met vier Zulu-boten (zie pagina 8) werd de brug over 55 kilometer van Arendonk naar haar bestemming in Herentals gevaren.

In totaal kostte de brug ruim € 3 miljoen. De provincie Antwerpen financierde € 1,8 miljoen. Vlaanderen en Europa droegen via het EFRO-structuurfonds elk € 600.000 bij.

Ook dit werd een succesvol project, dankzij de goede samenwerking tussen de overheden (provincie Antwerpen en De Vlaamse Waterweg), het studiebureau (Tractebel) en de aannemer (THV Mols nv-lemants).



Stalen boogbrug met daarachter de spoorbrug

De brug is 105 meter lang. Zij overspant het kanaal en de jaagpaden aan weerszijden ervan.



Aanvoer en montage boog



Aanvoer en montage boog



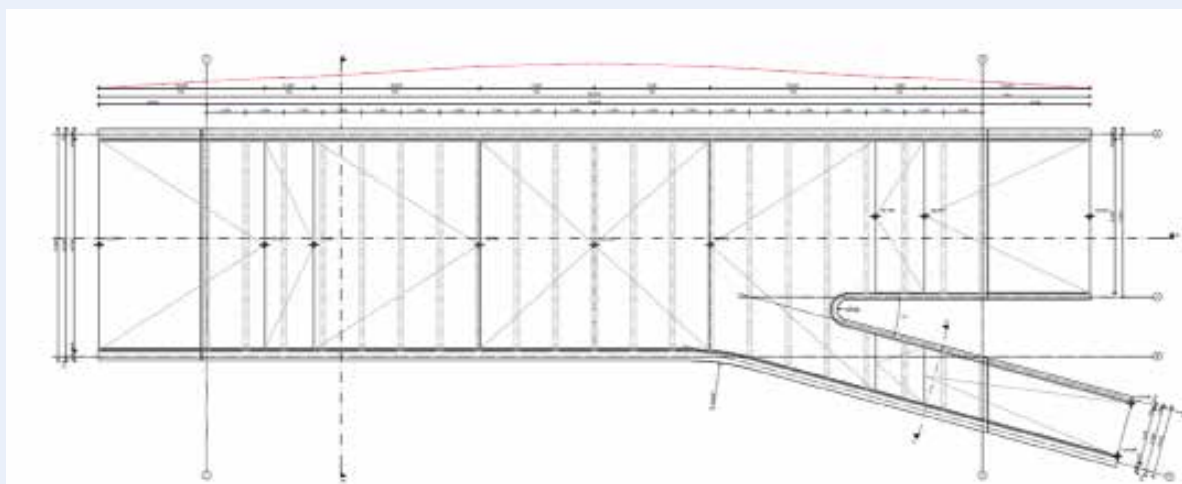
PODIUMBRUG, AANJAGER VAN EEN GEBIEDSTRANSFORMATIE

Edwin Thie | Senior Structural Engineer, Arup Nederland



Gebiedsontwikkeling voormalige industrieterrein Bocholt

Het oude industrieterrein in het centrum van de stad Bocholt (Duitsland) wordt ontwikkeld tot een nieuw gebied voor wonen en werken. SeARCH architecten, in samenwerking met landschapsarchitecten B+B, was verkozen om een concept te ontwikkelen voor de herontwikkeling van dit voormalige industrieterrein. Het gebied wordt gescheiden door de rivier de Aa en wordt omgetoverd tot een welkome openbare ruimte. Voor een goede ontsluiting zijn vier fiets+voetbruggen gepland om de beide delen van het gebied met elkaar te verbinden, maar dus ook om cohesie te creëren in de nieuwe stedelijke ontwikkeling. De verbindingsbruggen tonen de overgang van de historische industriële oorsprong naar het nieuwe culturele stadsdeel. Het ontwerp van de bruggen verbindt het heden met het verleden. Drie van de vier bruggen worden nieuw ontworpen en de bestaande voormalige spoorbrug wordt omgebouwd tot voetgangersbrug.



Bovenaanzicht

De Podiumbrücke met een overspanning van 47 m en een breedte van 14 m is de grootste van de vier. Het is niet alleen een voetgangersbrug die de twee zijden van de rivier met elkaar verbindt, maar ook een locatie voor evenementen. De Quartiersbrücke heeft dezelfde vormtaal, maar is iets kleiner in overspanning en smaller

van opzet. De Webereibrücke is een korte, gewapend betonbrug, terwijl de Eisenbahnbrücke een spoorwegbrug uit het begin van de 20e eeuw is die tot voetgangersbrug zal worden gerenoveerd. Arup was verantwoordelijk voor het constructieve ontwerp van de verschillende kunstwerken.

PODIUMBRÜCKE

Als eerste is de Podiumbrücke uitgewerkt en gerealiseerd. De feestelijke opening was in december 2018 en de brug dient als aanjager van de verdere gebiedsontwikkeling. De brug ligt nabij het Textielmuseum en bestaat uit twee dragende randliggers met een verlopende hoogte van 1,6 m tot 2,6 m in het midden, die tevens dienstdoen als leuning. Hiertussen liggen dwarsliggers waarop een kunststofdek rust.



Podiumbrücke over de Aa

MATERIAALOPTIMALISATIE

Het ontwerp van de brug is gebaseerd op de Eurocode 3: DIN EN 1993-2: stalen bruggen. Het ontwerp en de beoordeling zijn geanalyseerd met een platenmodel in Sofistik, een eindig elementenprogramma dat gespecialiseerd is in het ontwerp van driedimensionale constructies. De brug is volledig in 3D gemodelleerd om zo exact mogelijk de plaatdiktes te optimaliseren en op kosten te besparen. Vanwege de uiteindelijke slankheid van de platen was instabiliteit grotendeels maatgevend boven de sterkte van de onderdelen.

De stabiliteitscontroles worden uitgevoerd als onderdeel van de FEM-analyse. De plaatdiktes zijn geoptimaliseerd op basis van het voorkomen van instabiliteiten zoals plooi van de platen, knik van de verticale stijlen, knik van de bovenregel en kip van de geknikte randligger.

Als eerste stap is een lokale knikvormanalyse van de staalconstructie uitgevoerd om de

kritische gebieden van de randliggers in termen van stabiliteit te identificeren. Tevens zijn de lokale knikmodulussen bepaald. Deze stap is belangrijk om te begrijpen hoe de knikmodulussen eruit zien om zo de noodzakelijke imperfecties toe te passen in de volgende stap.

Als tweede stap worden deze kritische gebieden nader onderzocht. De eenvoudige details van de constructie (bijvoorbeeld rechthoekige platen) zijn ontworpen volgens DIN EN 1993-1-5, hoofdstuk 10, door gebruik te maken van de gereduceerde spanningsmethode. Deze methode kan worden toegepast om de spanningsgrenswaarde te bepalen. Het wordt gebruikt om de elastische toelaatbare spanningen in elk deel van het profiel te reduceren op basis van de lokale knik- en plooiweerstand.

Details met complexere geometrie worden als FEM-model gemodelleerd en een eerste imperfectie volgens DIN EN 1993-1-5 wordt toegepast. Dit lokale model wordt geanalyseerd middels een geometrische niet-

lineaire analyse. De resulterende spanning wordt getoetst aan de ontwerpgrenswaarde en de plaatdiktes worden geoptimaliseerd. Ten slotte wordt in een laatste stap een geometrische niet-lineaire analyse van de gehele constructie uitgevoerd. Vanwege de knik in één van de randliggers is deze gevoelig voor kip bij belastingen. Dit is een berekening die in toenemende belastingstappen rekening houdt met de werkelijke vervorming van de constructie. Voor deze analyse wordt geen rekening gehouden met initiële imperfectie, aangezien het systeem al vervormt door de toegepaste belastingen.

WEERFASTSTAAL

De hoofdliggers zijn gemaakt van weervaststaal, in de volksmond CorTenstaal® genoemd. Het duidelijke verschil tussen weervaststaal en normaal bouwstaal is dat weervaststaal onbeschermd, oftewel zonder conservering, wordt gebruikt. Een directe blootstelling aan de weersomstandigheden

Vanwege de knik in één van de randliggers is deze gevoelig voor kip bij belastingen.

tast het staal aan en vormt langzaam een beschermende laag. Dit betekent dat het corrosieproces na een paar jaar stopt en resulteert in een natuurlijke, roestkleur en een bijzonder aantrekkelijke esthetiek, passend bij oude industriële bakstenen gebouwen.

Hoewel de initiële materiaalkosten voor weervaststaal iets hoger zijn dan voor normaal bouwstaal, heeft het gebruik ervan voor bruggen economische voordelen voor de levensduur. Er is gedurende het gebruik van de brug geen hinder en evenmin zijn er kosten voor meerdere keren conserveren en alle bijbehorende werkzaamheden gedurende de levensduur van de constructie, die 100 jaar bedraagt. Een bijkomend positief effect is het milieuvoordeel: vervuiling van lucht en water, die het gevolg is van het conserveringsproces en het verwijderen van oude conserveringslagen, kan worden vermeden. Bovendien kan het staal zonder conservering aan het einde van de levensduur gemakkelijker worden gerecycled, waardoor de hoeveelheid afval minder groot wordt en een kringloopeconomie bevordert.

Om ervoor te zorgen dat het corrosieproces stagneert tot het bijna tot stilstand komt, moeten de constructiedetails zo worden ontworpen dat de constructie niet permanent nat is en dat regenwater kan wegvloeien. Bovendien moet men in de detaillering ermee rekening houden dat in de eerste paar jaar roestig water andere onderdelen kan bevleken.

In het ontwerp is rekening gehouden met de materiaalafname door het corrosieproces, van één mm op de buitenzijdes van de platen. Bij de landhoofden is er bovendien rekening mee gehouden dat de beheerder over de levensduur van de constructie een aantal keer mogelijke graffiti van de constructie zal verwijderen, waardoor de materiaalafname daar nog iets groter kan zijn.

Bij het toepassen van boutverbindingen dient men bij weervaststaal gebruik te maken van weervaststalen bouten, omdat er bij het gebruik van verzinkte bouten bi-corrosie tussen de onderdelen ontstaat. Men kan in de detaillering ook kiezen voor het isoleren van de verzinkte bouten om dit te beheersen. Om de constructie egaal te laten verkleuren is het aan te raden na fabricage de gehele constructie te stralen. Dan wordt de walshuid verwijderd en zal de constructie verder gelijkmatig verkleuren.

KUNSTSTOFDEK

Glasvezelversterkte kunststof (GVVK) is een composietmateriaal dat bestaat uit twee componenten: glasvezels en polyester of epoxyhars. Beide componenten alleen zijn niet bruikbaar voor de bouw, maar samen zorgen ze voor een ideaal materiaalgedrag. Het fundamentele voordeel van een composietmateriaal is de vermindering van het gewicht in vergelijking met staal of aluminium. Het basismateriaal is licht en kan worden geoptimaliseerd door de

materiaalcombinatie en de richting van de vezel te kiezen. Om deze reden is het toegepast bij de Podiumbrug, zodat de staalconstructie niet zwaarder wordt belast dan nodig. Bovendien hebben vezelversterkte kunststoffen in vergelijking met beton of staal voordelen op het gebied van corrosie, chemische resistentie en elektrische en thermische isolatie.

In de afgelopen decennia zijn composietmaterialen steeds populairder geworden en hun voordelen worden zeer gewaardeerd. Onderzoek en productontwikkeling hebben de materiaaleigenschappen voortdurend verbeterd. Verbeterde FEM-gereedschappen maken nu modellering met realistischer materiaalgedrag en ontwerpveiligheid mogelijk.

Voor het ontwerp van het brugdek worden geëxtrudeerde VVK-profielen (FBD 300) gebruikt. Het profiel bestaat uit een prismatische holle sectie van 333 mm breed en 80 mm hoog. De segmenten worden naast elkaar geplaatst om een continu gesloten gebied over de brug te vormen. Op het bovenvlak wordt een VVK-plaat met een dikte van 10 mm op de elementen gelijmd. Deze dient als bescherm laag, omdat er bovenop het dek een 50 mm dikke asfaltlaag wordt aangebracht. Door het later verwijderen van het asfalt zou mechanische schade aan de toplaag kunnen ontstaan. Het wordt dus niet als constructief element gebruikt, maar dient slechts als bescherm laag en verbinding van de FBD 300 elementen.

Aangezien het VVK-profiel FBD 300 in Duitsland nog niet onder codes of technische goedkeuringen valt, wordt het ontwerp uitgevoerd volgens een aanbeveling van de BÜV, een technische werkgroep van controleurs.

Om het bouwproces te vereenvoudigen, wordt het VVK-profiel FBD 300 met een epoxymortel Sikadur 30 volledig verlijmd op de stalen dwarsliggers in plaats van het toepassen van bouten. Omdat nog niet aangetoond kan worden dat de lijmverbinding een levensduur van 100 jaar heeft, is van twee scenario's uitgegaan.



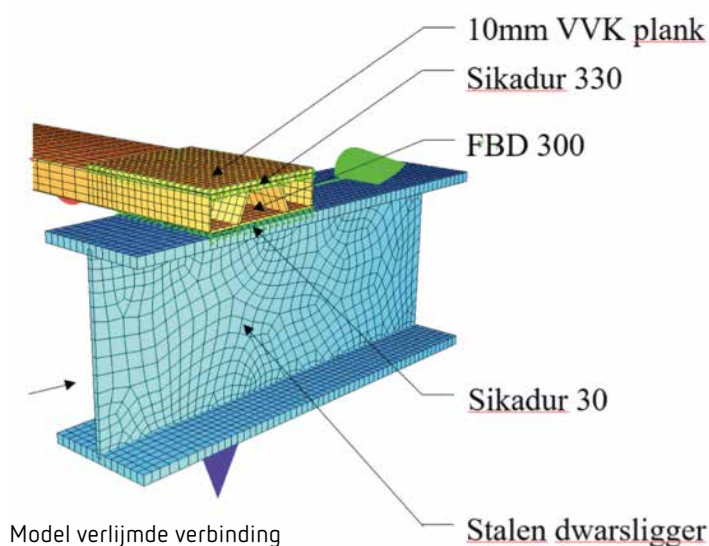
Randligger van weervaststaal

Allereerst het scenario waarbij de verbinding constructief werkt, waardoor het dek en de dwarsliggers dus samenwerken. Daarnaast is een scenario uitgewerkt waarbij de lijmverbinding niet constructief is en het dek dus niet constructief meewerkt. In dit scenario zorgt het dek niet voor horizontale schijfwerking en moet er onder de brug een windverband worden aangebracht. Het VVK-dek zal door de verbinding onderhevig zijn aan krachten vanuit het globale constructiesysteem. Deze krachten worden bijvoorbeeld veroorzaakt door de verschillende thermische uitzetting van staal en VVK en ook door het feit dat het VVK-dek zich niet in de neutrale as van de totale doorsnede bevindt. Gegarandeerd moet worden dat de lijmlaag tussen staal en dek de geïnduceerde afschuifkrachten kan opnemen. Om het composietgedrag tussen de VVK en de staalconstructie te modelleren, wordt het dek als plaalement in het globale 3D-model geïmplementeerd. Om het gedrag van de lijmverbinding af te dekken, worden deze als veerelementen gemodelleerd en aangepast aan de stijfheid van de gekozen lijm, de epoxymortel Sikadur 30. Aangezien de epoxymortel elastisch gedrag vertoont, moet de lijmlaag worden ontworpen voor de hoogste spanningspieken. De doorslaggevende waarden treden op in de buurt van de hoofdligger: merk op dat het VVK-dek alleen op de vloerbalken wordt verlijmd, niet direct op de hoofdliggers. Vanwege de verschillende

uitzettingscoëfficiënten van staal en VVK ontstaan er schuifspanningen onder temperatuurveranderingen.

TRILLINGEN

Trillingen zijn de laatste jaren een belangrijk thema geworden in het ontwerp van fiets+voetbruggen. Ontwikkelingen en innovaties op het gebied van materiaaleigenschappen, architectonisch ontwerp, ontwerpmethoden en bouwtechnieken, hebben geleid tot bruggen die lichter en slanker zijn. Deze bruggen zijn over het algemeen gevoeliger voor dynamische belasting en kunnen maatgevend zijn in het ontwerp van de brug. Voetgangers zorgen voor een dynamische belasting en dit kan ervoor zorgen dat bruggen in een oncomfortabele trilling komen. Daarom is het belangrijk dat voetbruggen niet alleen ontworpen zijn voor statische belastingen, maar ook voor deze bewegende dynamische belastingen. Het tempo van de voetganger beïnvloedt het trillingsgedrag van de brug aanzienlijk. In sommige gevallen, wanneer de loopfrequentie de eigen frequentie van de brug nadert, kunnen deze trillingen tot hoge acceleraties leiden. In dat geval kan de voetganger zich ongemakkelijk of zelfs onveilig voelen. De loopfrequentie varieert tussen de 1,25 - 2,30 Hz en de grenswaarde in de norm voor oncomfortabele acceleraties is $0,7 \text{ m/s}^2$. Analyses van de Podiumbrug gaven een eigenfrequentie van de brug van 1,6 Hz,



Trillingen zijn de laatste jaren een belangrijk thema geworden in het ontwerp van Fiets+Voetbruggen

Plaats demper

dus binnen de loopfrequentie. Dynamische analyse resulteerde in te hoge acceleraties en daarom is besloten om in het ontwerp rekening te houden met dempers in de brug om dit te beheersen.

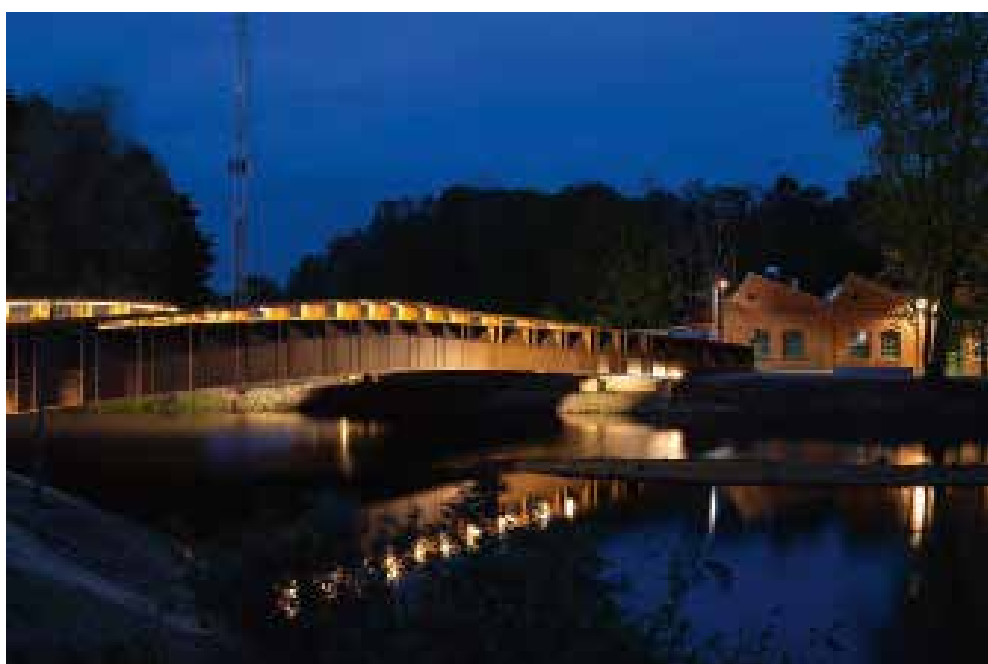
Vanwege kleine onzekerheden in de dynamische modellering is het gedrag van de brug na oplevering gemeten. De resultaten kwamen goed overeen met de aannamen. Op basis van deze meetresultaten zijn de uiteindelijke dempers afgestemd en toegepast tussen de dwarsdragers in het midden van de overspanning.

CONCLUSIE

De Podiumbrug is gerealiseerd als aanjager van de nieuwe gebiedsontwikkeling te Bochoolt. Enerzijds als noodzakelijke



verbinding tussen de gebieden gescheiden door de rivier de Aa, en anderzijds ook als toegangspoort voor een extra evenementenruimte in het gebied. De brug is ontworpen met onderhoudsvriendelijke materialen als weervaststaal voor de hoofdliggers en kunststof voor het dek. Met behulp van verfijnde analyses zijn de materialen geoptimaliseerd met als resultaat een economisch ontwerp. Door deze verfijnde analyses konden de plaatdiktes worden gereduceerd zonder dat lokale instabiliteiten een gevaar zijn. En bovendien konden daarmee de trillingen van de brug worden beheerst met toepassing van externe dempers in de brug.



Verlichte brug

EERSTE BEWEEGBARE BIOCOMPOSITIETRUG IN OPENBAAR WEGENNET FRYSLÂN PRIMEUR!

ir. R.P. (Rinze) Herrema | business unit manager bij Witteveen+Bos
J.R.J. (Jorian) Wals MSc | adviseur Contracten en Marktbenadering
bij Witteveen+Bos

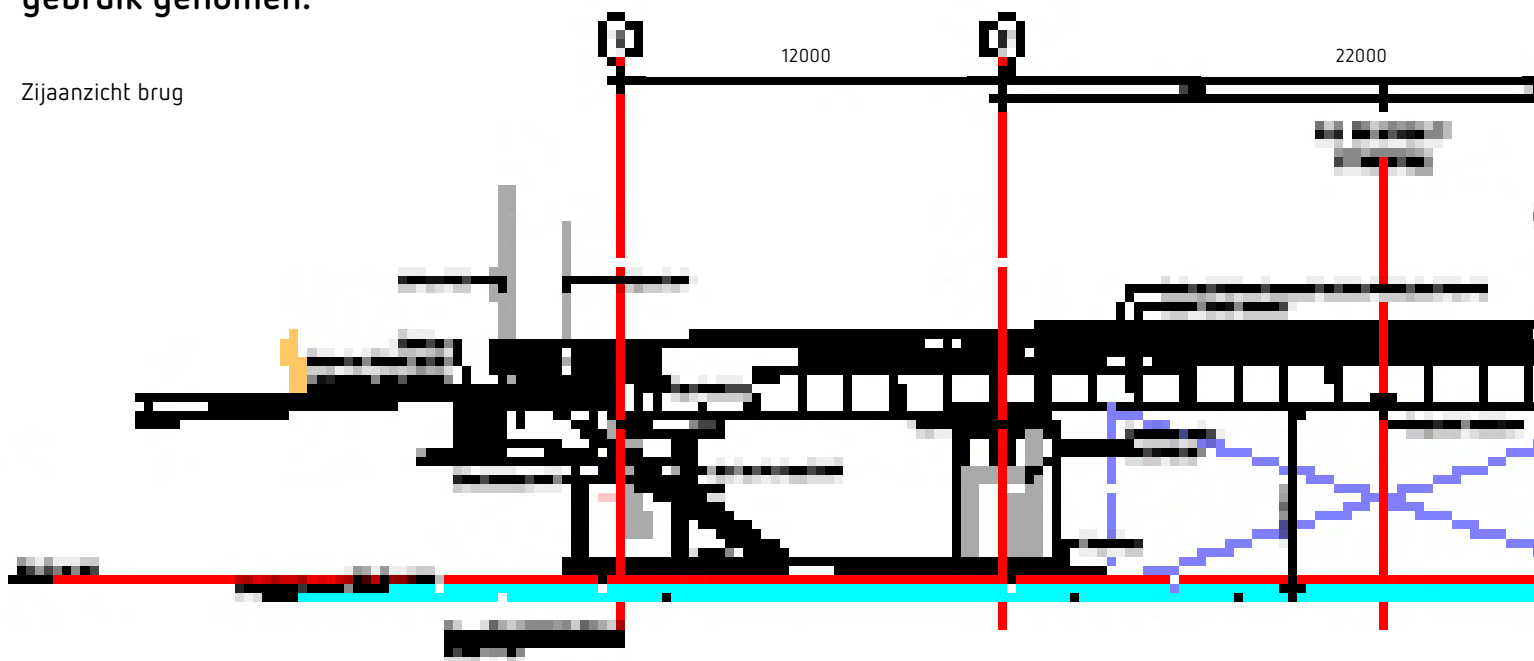




Brug over het Harinxmakanaal, nabij Ritsumasyt. Foto: Bouwfotografie.nl

Eerste beweegbare brug ter wereld in het openbare wegennet, gemaakt van biocomposiet. Normaliter verwacht je bij zo'n headline nieuwsberichten uit China of een oliestaat. In dit geval is niets minder waar. Deze brug staat 'gewoon' bij ons in Nederland, in het Friese dorpje Ritsumasyt, amper 70 inwoners tellend, onder de rook van Leeuwarden. In het afgelopen jaar is deze brug gebouwd en eind november 2019 in gebruik genomen.

Zijaanzicht brug



WAAROM EEN BRUG VAN BIOCOMPOSITIET?

In 2010 startte de aanleg van de Haak om Leeuwarden, een nieuwe rondweg om de doorstroming rondom de Friese hoofdstad te bevorderen. Eind 2014 is het wegtracé in gebruik genomen. Daarna startte het opruimen van de oude wegen en werd de gebiedsontwikkeling rondom 'de Haak' vormgegeven. Eén van de opgaven in deze gebiedsontwikkeling is het realiseren van een nieuwe verbinding voor fiets'voetgangers over het Van Harinxmakanaal, tussen Ritsumasyl en Deinum. Bovendien wilde de provincie Fryslân met deze nieuwe brug invulling geven aan hun duurzame en circulaire ambities, specifiek door het toepassen van biocomposieten. Dat de provincie een serieuze ontwikkeling van natuurlijke materialen in de infra wil

bevorderen, blijkt wel uit de randvoorwaarden: een doorvaartbreedte van 17 meter met een gangbare levensduureis van minimaal 100 jaar.

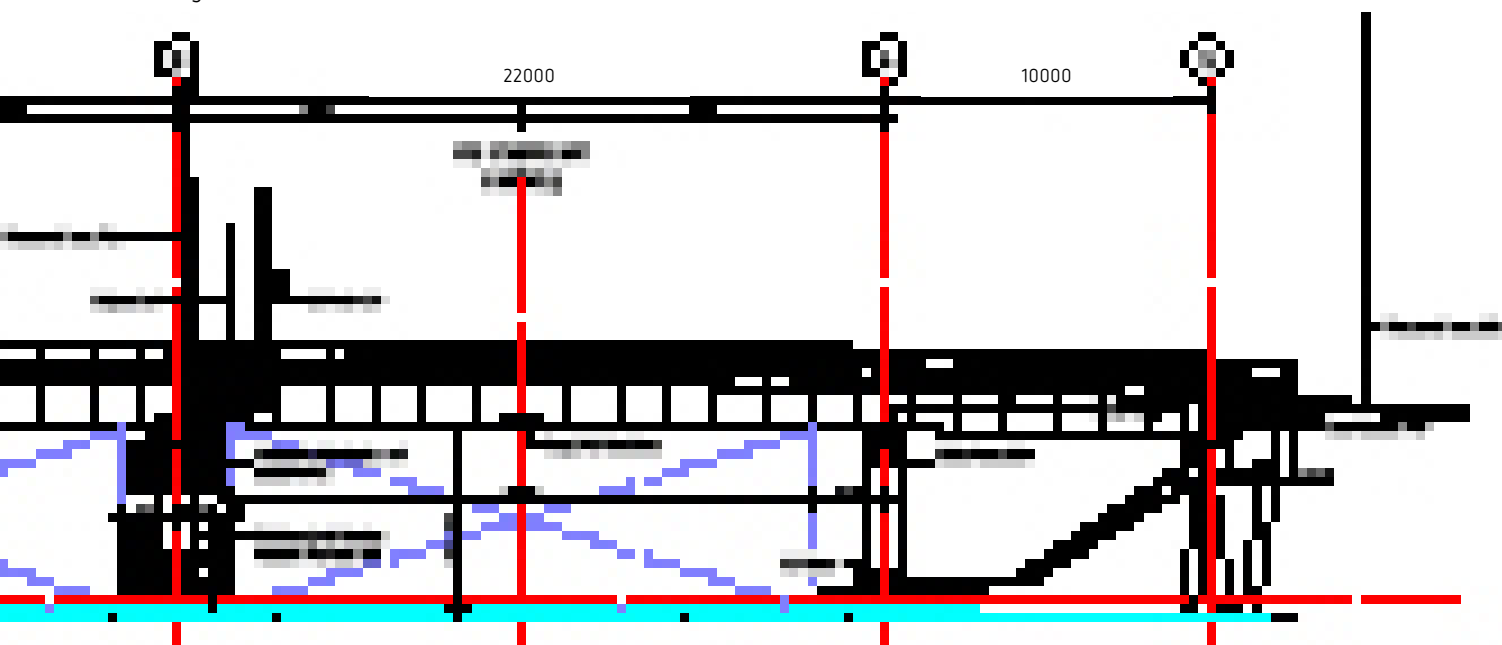
De transitie naar een circulaire economie is wenselijk en noodzakelijk voor de provincie Fryslân. Thema's als klimaatverandering, globalisering en de toenemende wereldbevolking dwingen ons anders te denken, andere ideeën te ontwikkelen, innovatieve producten te ontwikkelen en ons consumentengedrag aan te passen. De provincie zet zich al geruime tijd in voor deze omwenteling die werd toegejuicht door Prins Carlos de Bourbon de Parme tijdens de Rede van Fryslân in 2016. 'Friesland bevat alle ingrediënten om koploper te worden, maar wij mogen ons best sterker profileren op dit thema'.

DE VOORBEREIDINGSFASE

In de voorbereidingsfase is door de ingenieurscombinatie Sweco/Witteveen+Bos onderzocht welke natuurlijke materialen kansrijk zijn voor een robuuste toepassing in de infrastructuur. Ook werd onderzoek verricht naar de wijze waarop het onderwijs kon worden betrokken en hoe marktpartijen effectief konden bijdragen om het doel van de provincie te bereiken. In 2015 voerde de ingenieurscombinatie onderzoek uit naar de geschiktheid van biocomposieten als constructiemateriaal voor kunstwerken. Uit dit onderzoek bleek dat biocomposieten een serieuze stap kunnen zijn in de ontwikkeling van circulaire kunstwerken op basis van een natuurlijke kringloop. Duidelijk werd dat de concrete toepassing van biocomposiet als constructiemateriaal van een brugdek een ambitieuze, maar niet onmogelijke opgave is. De provincie schreef twee aanbestedingen uit: één voor het contracteren van een aannemer voor de realisatie van de onderbouw, de remming- en geleidewerken en de elektrotechnische- en werktuigbouwkundige onderdelen van de brug. De tweede aanbesteding was bedoeld om een producent van brugdekken te contracteren die specifieke (materiaal)kennis van composieten kon inbrengen. De gecontracteerde aannemer en producent vormden samen met de provincie Fryslân, de hierna genoemde onderwijsinstellingen en de ingenieurscombinatie het bouwteam dat de ontwikkeling van de biocomposiet brug zou realiseren.



Foto: Bouwfotografie.nl





Materiaalbeproeving biocomposiet

voor het biocomposiet, Spie en Antea voor het civiele- en E&W-gedeelte van het werk (als combinant, respectievelijk onderaannemer van Strukton). De samenwerkingsvorm van het bouwteam is doorvertaald naar de ontwerpteams. Dat leidde tot gezamenlijke ontwerpessies waardoor raakvlakken direct werden geïdentificeerd en knelpunten het hoofd konden worden geboden.

Eén van die knelpunten was dat het materialenonderzoek van het biocomposiet in tijd parallel liep aan het ontwerp. Dat zorgde ervoor dat gedeeltes van het ontwerp moesten worden aangepast door nieuwe resultaten uit het materialenonderzoek. Een flinke uitdaging voor de betrokken ontwerpers en ingenieurs. Met name kruipgedrag, vermoeiingssterkte en thermische uitzetting van biocomposiet zijn kenmerkende en afwijkende eigenschappen ten opzichte van glasvezel versterkte kunststof. Het toevoegen van extra biocomposietvezels op kritieke plekken, het overdimensioneren van de opzetwerken en de draaipijler, kan deze risico's beheersen. Ondanks de extra ontwerpiteraties is in slechts anderhalf jaar tijd het gehele proces van variantenstudie tot en met uitvoeringsontwerp doorlopen.

Al dit werk leidde tot het ontwerp van een asymmetrische draaibrug met een biocomposiet dek van 22 m overspanning. De brugdekken van zowel het draaideel als de aanbruggen worden uitgevoerd in 85% biobased materiaal (op basis van vlasvezels, epoxyharsen/-harders en balsahout) met een levensduur van 100 jaar. In totaal wordt 66 m van de draaibrug en de aanbruggen in biobased materiaal uitgevoerd.

SLOPEN OUDE BRUG, START BOUWWERKZAAMHEDEN BIOCOMPOSITIE BRUG

In de zomer van 2018 is begonnen met de sloop van de oude brug. Daarbij zijn de circulaire ambities van de provincie niet uit het oog verloren: het betonpuin dat vrij kwam bij de sloop is hergebruikt bij het nieuwe betonwerk voor de onderbouw van de biocomposiet brug. Het stalen val dat vrij kwam bij de sloop, is ter beschikking gesteld aan een gemeente elders in de provincie, die van plan was het val te hergebruiken bij de realisatie van een nieuwe vaste brug. Naderhand bleek het dek in onvoldoende



Wapening voor het biocomposiet

provincie vastgesteld, omdat op deze manier ook de uitkomsten van het materialenonderzoek en de productietechniek van invloed konden zijn op de uiteindelijke keuze van het brugtype. Daarnaast zijn expliciet de kansen en risico's meegewogen die waren opgesteld door de beheerder van de brug en de ingenieurs van de aannemer, producent en ingenieurscombinatie.

De vergeleken varianten waren onder andere een basculebrug, klapbrug, ophaalbrug, hefbrug, tafelbrug en draaibrug. Opmerkelijk hierbij was dat de uiteindelijk gekozen variant - een asymmetrische draaibrug - vooraf door geen van de ingenieurs van de betrokken partijen als voorkeursvariant naar voren kwam. De gemeenschappelijke inzichten van de betrokken partijen in het bouwteam hebben echter geleid tot de keuze voor dit type als voorkeursvariant. Het uitgangspunt van het ontwerp is eenvoud: een brug met een rustig en evenwichtig beeld, in gesloten en geopende toestand. Omdat biocomposiet ook voor het publiek een onbekend materiaal is, is de brug in staat om aan het publiek uit te leggen wat dit nieuwe materiaal precies is door het materiaal letterlijk binnen handbereik van het publiek te brengen: handrail en randelementen zijn uitgevoerd in (middels transparante coating geconserveerd) biocomposiet.

Het ontwerp van de biocomposiet brug kwam tot stand door het architectonische beeld van Quist Wintermans Architecten te laten uitwerken door een ontwerpteam bestaande uit de ingenieurscombinatie Sweco/Witteveen+Bos en Delft Infra Composites

BOUWTEAM, MATERIALENSTUDIE EN ONTWERPFASE

In april 2017 startte het bouwteam onder de werknaam DRIVE (Doelgericht, Realistisch, Innovatief, Vooruitstrevend, Eensgezind) met haar werkzaamheden. Onder regie van de provincie was de eerste stap het materialenonderzoek, met de aan GreenPAC gelieerde onderwijsinstellingen NHL/Stenden en Windesheim, en daarnaast TU Delft, KU Leuven en Hochschule Osnabrück. Deze onderwijsinstellingen hebben elk verschillende soorten en samenstellingen van vezels, hars, harder en kernmateriaal beproefd op eigenschappen als treksterkte, elasticiteitsmodulus, gevoeligheid voor kruip, hot/wet-gedrag, en biocontent. Naast deze kenmerkende materiaaleigenschappen was ook de leverbaarheid van materialen op grote(re) schaal belangrijk alsmede de mate waarin de vezels konden worden geïmpregneerd door hars.

Parallel aan de materialenstudie is een variantenstudie uitgevoerd naar het type brug. Dit was vooraf bewust nog niet door de

technische staat voor hoogwaardig hergebruik.

De gemeente Waadhoeke verleende de omgevingsvergunning. Ook voor hen was de start van de bouw en het afgeven van de vergunning een spannend moment, aangezien er geen standaardrichtlijnen bestaan voor een kunstwerk van biocomposiet materiaal. Door de gemeente vooraf goed te betrekken bij de ontwikkelingen van het materiaal en de inzet van onafhankelijke biocomposietspecialisten uit binnen- en buitenland bij de toetsing van het ontwerp, kon de gemeente met voldoende onderbouwing de vergunning verlenen.

Nadat de laminaten geïnjecteerd en uitgehard waren, werden de onderdelen samengesteld tot twee losse brugdekken. Na het aanbrengen van een 3-laags coatingsysteem, dat het composiet beschermt tegen weersinvloeden, dooizouten en kleine beschadigingen, vond een postcuringproces plaats. Hierbij wordt het brugdek opgewarmd met heaters tot een temperatuur van minimaal 80 °C. Dit heeft tot doel om de materiaaleigenschappen te verbeteren. Het proces om de temperatuur evenredig over het dek te kunnen verdelen en om de temperatuur niet te hoog te laten oplopen, luistert zeer nauw. Een te hoge temperatuur kan mogelijk tot schade leiden aan het dek en verbranding van aangebrachte sensoren.

Toen de remming- en geleidewerken, de aangepaste oeverconstructie, de landhoofden en de pijlers in het voorjaar van 2019 gereed waren, is het vaste dek in juli op zijn definitieve plek gehesen. Het beweegbare dek volgde in oktober. Het inhijzen van de brugdekken gebeurde op het moment dat de initiële krimp had plaatsgevonden. Door de samengestelde dekken op de productielocatie al voor te belasten, kruipt het dek naar de gewenste kromming.

Dat de praktijk 'buiten' soms weerbarstiger is dan de onderzoeks- en ontwerpfasen van het project, werd hier eveneens ondervonden: werd het dek in het ontwerp nog zodanig gedimensioneerd om invulling te geven aan de materiaaleigenschappen krimp, vermoeiing en vervorming, in de praktijk bleek de stijfheid van de dekken hoger dan berekend.



Inhijzen van de brug. Foto: Bouwfotografie.nl

HET POST-PILOT TIJDPERK: OP WEG NAAR 'IMPACT MET DUURZAAMHEID'

Uiteraard is het belangrijk dat er vergelijkbare vervolprojecten komen. Om écht impact te kunnen hebben op circulariteit en duurzaamheid, moet het materiaal vaker worden toegepast in infraconstructies. Op die manier kan een doorontwikkeling plaatsvinden en het ontwerp verder worden geoptimaliseerd. Uit het materiaalonderzoek bleek dat daarnaast schaalvergroting van essentieel belang is om de grote chemische producenten van de harsen te overtuigen om de biocontent te verhogen naar uiteindelijk 100%. Daarin voorziet dit project ook, met onder meer een technisch seminar in Leeuwarden, waarin kennis over biocomposiet als kansrijk materiaal in infraconstructies is gecommuniceerd met constructeurs, materiaaldeskundigen, overheden en andere belangstellenden.

De brug is voorzien van een geavanceerd monitoringssysteem dat data verzamelt over het gedrag van biocomposiet zoals vervormingen, vochtgehalte, belastingen en temperatuur. Met behulp daarvan kunnen afgeleiden als krimp en vermoeiing worden

bepaald. Verder kan worden gevalideerd of de berekende constructieve levensduur van de brugdekken strookt met de praktijk. De data worden daarbij gekoppeld aan andere componenten die data verzamelen, zoals het meteostation, de verkeersintensiteit, de elektrotechnische en werktuigbouwkundige installaties. De data worden ontsloten en in themasessies gedeeld met onderwijsinstellingen, asseseigenaren van overheden en materiaaldeskundigen. Op deze manier levert het project voor langere tijd waardevolle informatie over biocomposiet als toekomstbestendig bouw materiaal in de infrastructuur. Het enige dat dan nog rest is een tweede opdrachtgever die biocomposiet bouw materiaal wil toepassen in infrastructurele kunstwerken.

Vanaf eind november 2019 kan in Ritsumasyl gefietst worden over 's werelds eerste beweegbare biocomposiet fietsbrug met een levensduur van 100 jaar. Dankzij de inspanningen van innovatieve aannemers, producenten, ingenieurs en een provinciale overheid die ondernemend een innovatief project in de markt durfde te zetten, is een belangrijke stap gezet op het gebied van nieuwe materialen in de infrawereld!



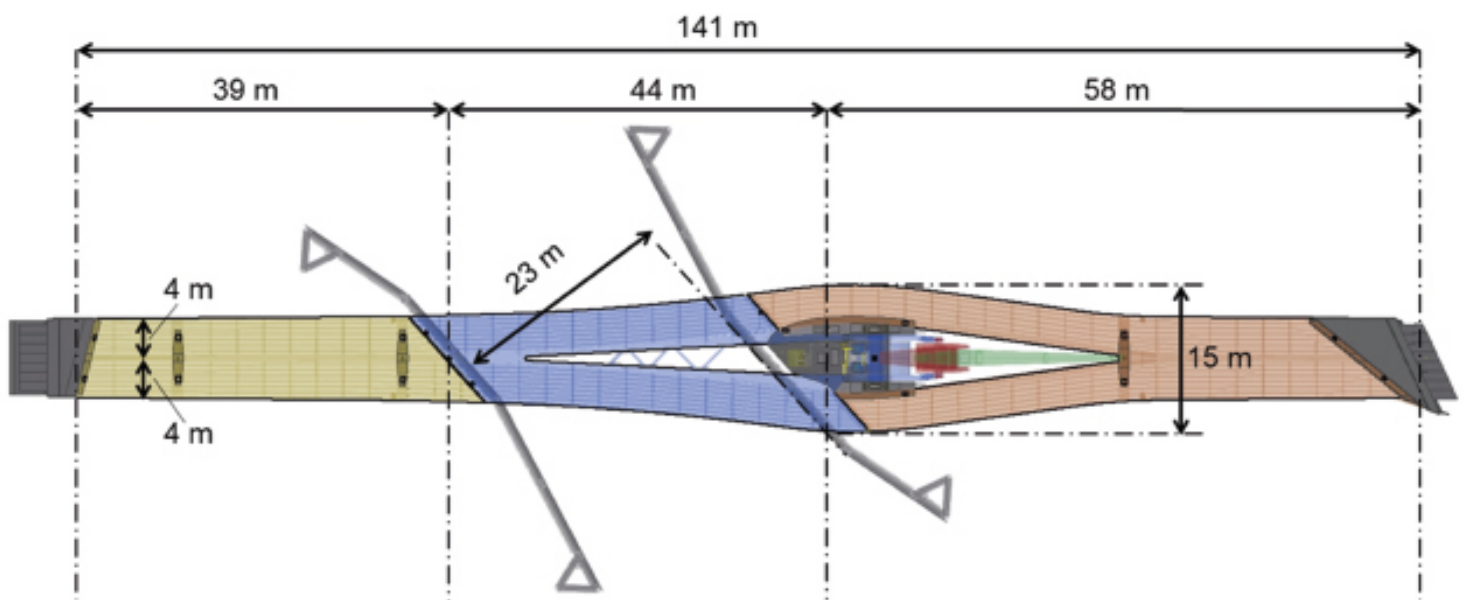
PROJECTOVERZICHT

Fietsbrug over het Van Harinxmakanaal nabij Ritsumasyl (2019)	
Opdrachtgever	Provincie Fryslân
Vormgeving	Quist Wintermans Architecten
Ontwerpteam	Ingenieurscombinatie Sweco/Witteveen+Bos Antea (civiele constructie) Spie (Electra+Werktuigbouwkundige onderdelen)
Materiaalstudie biocomposiet	Delft Infra Composites NHL/Stenden, Windesheim, TU Delft, KU Leuven en Hochschule Osnabrück
Uitvoering onderbouw	De Boer & De Groot civiele werken- Harlingen
Uitvoering bovenbouw	Takke Breukelen BV

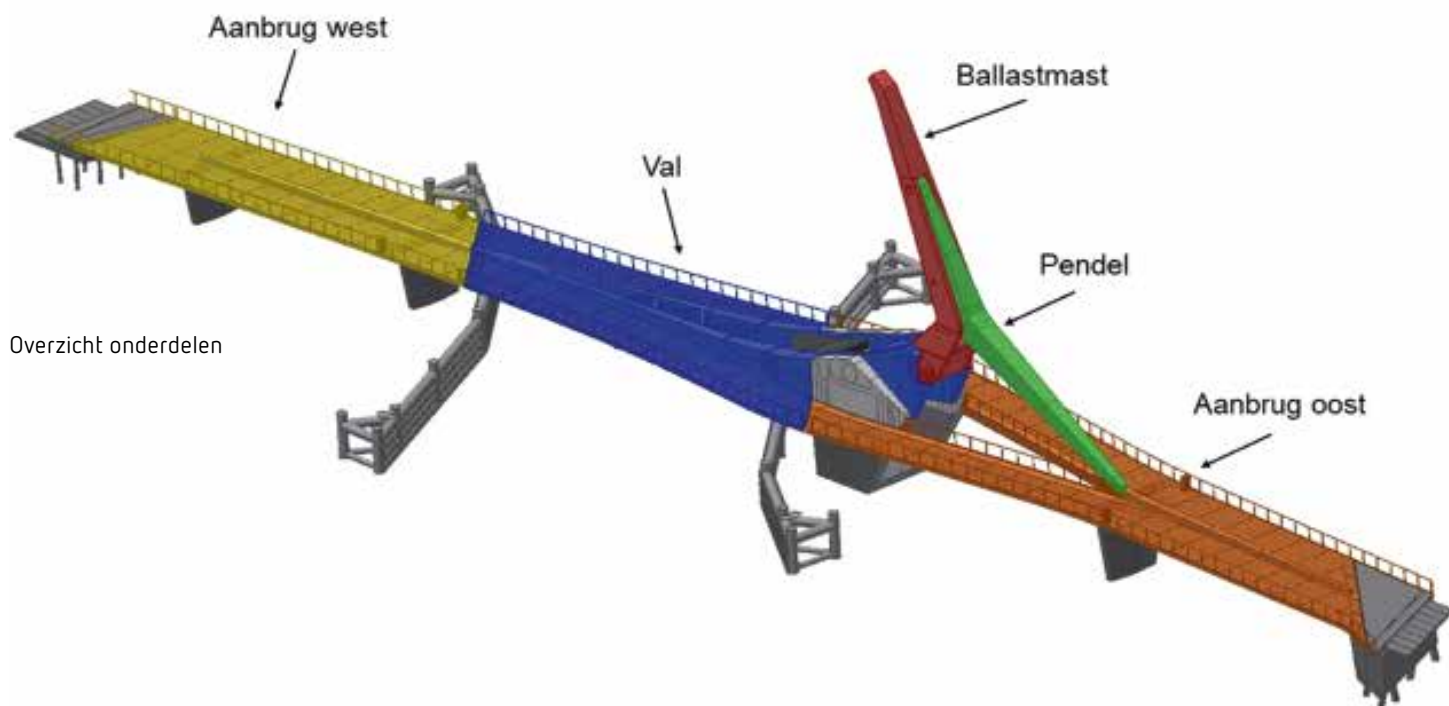
CONSTRUCTIEF ONTWERP PRINS CLAUSBRUG DORDRECHT

Britte van Kortenhof | Ontwerpmanager lv-Infra b.v.

De Prins Clausbrug is een nieuw te realiseren beweegbare fiets+voetgangersbrug die het centrum van Dordrecht gaat verbinden met de nieuwe wijk Stadswerven. De brug heeft een lengte van 141 m en bestaat uit twee stalen aanbruggen en een beweegbaar deel van bijna 50 m lengte vanaf de draaias gemeten. De brug kruist de vaarweg schuin waardoor het val aanzienlijk langer is dan de 23 m brede doorvaart van de brug. De brug wordt hydraulisch aangedreven en het val wordt daarbij om de draaias in evenwicht gehouden door een uniek systeem, bestaande uit een rechtop staande, scharnierende ballastmast die met een pendelstaaf overeind wordt gehouden.



Hoofdmaatvoering



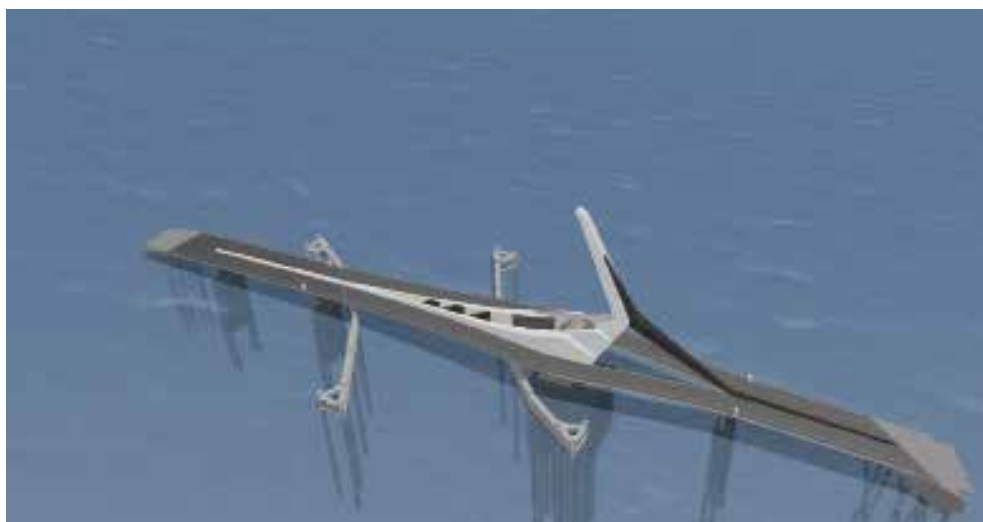
Overzicht onderdelen

Het unieke bewegingsconcept en de ambitieuze vormgeving van het referentie-ontwerp, opgesteld door architect René van Zuuk, vormden de belangrijkste uitdaging in de uitwerking van het architectonisch ontwerp. Bij de uitwerking naar een realiseerbaar, onderhoudbaar en betrouwbaar functionerend technisch ontwerp, moesten alle onderdelen intensief op elkaar worden afgestemd om aan de hoge vormgevingseisen te kunnen voldoen.

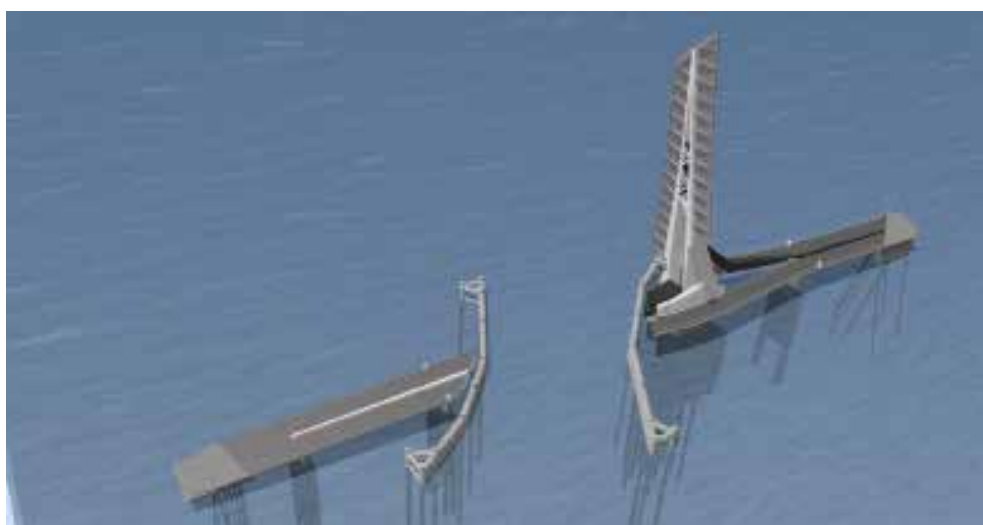
Het constructief ontwerp en de uitvoering van de brug zijn in 2018 door de Gemeente Dordrecht gegund aan de bouwcombinatie Dura Vermeer en Hillebrand. Iv-Infra heeft in opdracht van de bouwcombinatie het referentieontwerp uitgewerkt tot een integraal definitief ontwerp en uitvoeringsontwerp; zij verzorgden tevens dit artikel.

AMBITIEUS ARCHITECTONISCH ONTWERP

Het architectonische ontwerp is van een hoge ambitie en in belangrijke mate bepalend voor de technische uitwerking van het ontwerp. Allereerst de imposante ballastmast en pendelstaaf die ver de lucht in steken en een bijzondere beweging maken bij openen en sluiten van de brug. In de woorden van de architect: *“Een prachtige beweging waarbij de mast eerst voorover buigt en daarna weer terug komt. Dat betekent dat de ballastmast bij opening naar het val toe beweegt en dan samen met het bewegende val tot stilstand komt op 85 graden. Bij sluiting blijft de ballastmast de eerste 45 graden van de beweging bij het val waarna de mast zich majestueus opricht.”*

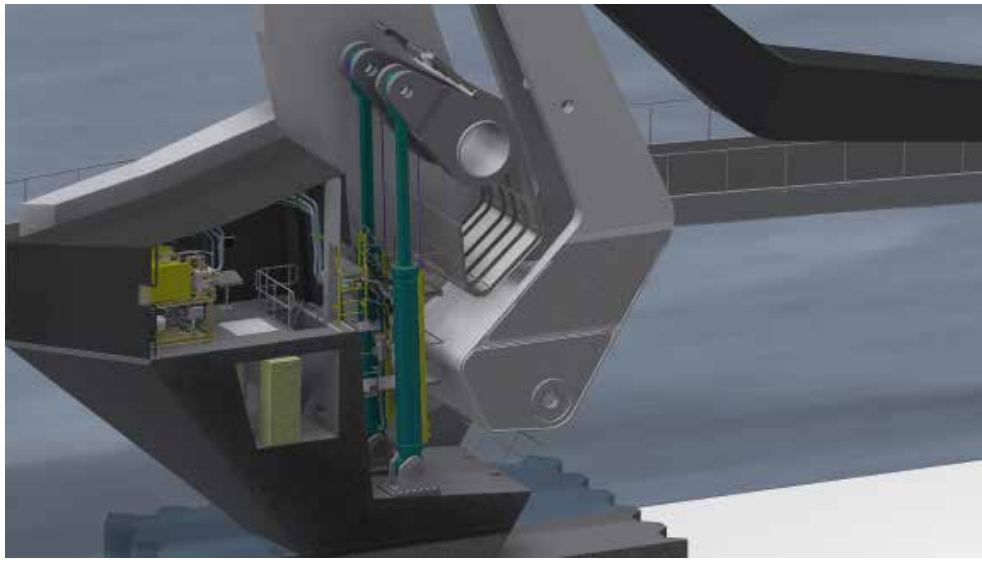


Ontwerp brug – dicht

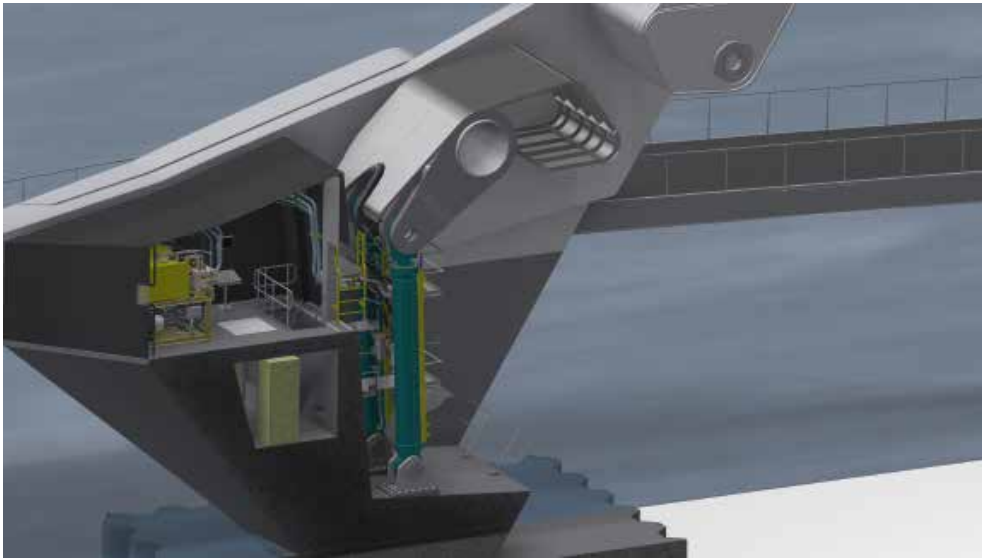


Ontwerp brug – open

Vanwege de hoge vormgevingseisen zijn alle draaipunten volledig weggewerkt



Aandrijving brug (geopende stand) t.p.v. hoofddraaipunt 1



Aandrijving brug (gesloten stand) t.p.v. hoofddraaipunt 1

De staal- en betonconstructies van de brug zijn uitgevoerd in vloeiende vormen. De twee hoofdliggers van het val verjongen in hoogte-richting bovendeks vanaf het draaipunt in een geleidelijke beweging en gaan vloeiend over in de middenberm op de westelijke aanbrug. De hoofdliggers zijn gescheiden ter plaatse van de achterzijde van het val, om ruimte te bieden voor de ballastmast, en vloeien aan de voorzijde samen tot één hoofdligger. Ter plaatse van de scheiding zijn de hoofdliggers onderling gekoppeld door vakwerkstaven. De stalen aanbruggen zijn eveneens vloeiend en slank vormgegeven. Aanbrug oost krult met twee brugdelen rondom de kelderpijler samen tot één dek aan het uiteinde van de brug. De fietsers en voetgangers die de brug passeren worden aan weerszijden om de ballastmast en pendelstaaf heen geleid en hebben daarbij zicht op het indrukwekkende mechanisme van de brug.

Omdat de kelder geen ballastkist hoeft te bergen, kon deze als een uitwaaiende ronde sokkel worden uitgevoerd, slank oprijzend uit het water.

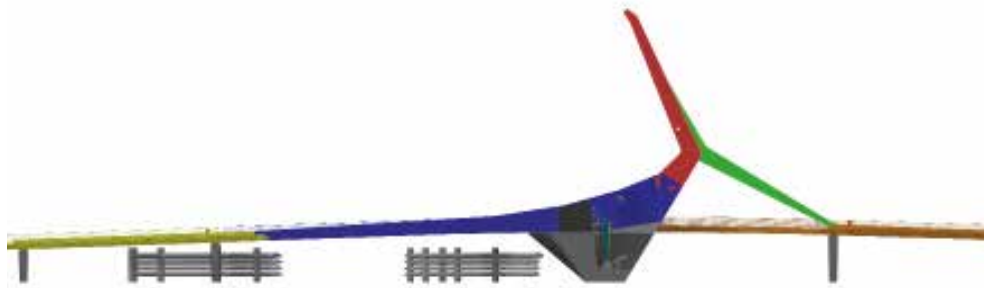
Vanwege de hoge vormgevingseisen zijn alle draaipunten van de bewegende onderdelen (zes stuks in totaal) volledig weggewerkt onder kappen die samenvloeien met de aansluitende constructiedelen. Het inpassen en voor onderhoud bereikbaar houden van de draaipunten in het technisch ontwerp bleek in de praktijk een hele uitdaging te zijn, met name vanwege de beperkte ruimte die er voor deze onderdelen beschikbaar is. Beide aandrijfcilinders van de brug mogen gezien worden en staan daarom buiten de kelder opgesteld. Vanaf de oostelijke zijde van de brug is de opstelling en de werking van de cilinders duidelijk zichtbaar.

BEWEGINGSMECHANISME MET SCHARNIERENDE BALLASTMAST

Het val, de ballastmast en de pendelstaaf bewegen als één mechanisme. De ballastmast is met draaipunten gekoppeld aan de hoofdliggers van het val; om de ballastmast in alle standen te stabiliseren is deze aan de bovenzijde scharnierend gekoppeld met de pendelstaaf. De pendelstaaf is op zijn beurt gekoppeld aan de aanbrug door middel van een draaipunt. Tijdens het bewegen van het val beweegt het draaipunt van de ballastmast zich in een cirkelvormige baan om de hoofddraaipunten. Aangezien de ballastmast (van scharnierpunt tot scharnierpunt) en de pendelstaaf een vaste lengte hebben, zijn de posities en de zwaartepunten van zowel de ballastmast als de pendelstaaf afhankelijk van de positie van het draaipunt van de ballastmast. Het bewegende systeem is hierdoor een afgeleide van de positie van het draaipunt van de ballastmast. Omdat de pendel de ballastmast overeind houdt, oefent de pendelstaaf naast een verticale component ook een horizontale belasting uit (in langsrichting van de brug) op het onderdraaipunt. Deze horizontale component wordt via de hoofdliggers van aanbrug oost door middel van doken teruggeleid naar de sokkel, zodat de positie van het onderdraaipunt van de pendel ten opzichte van het hoofddraaipunt gefixeerd is.

VERLOOP ONBALANS BIJ BRUGBEWEGING

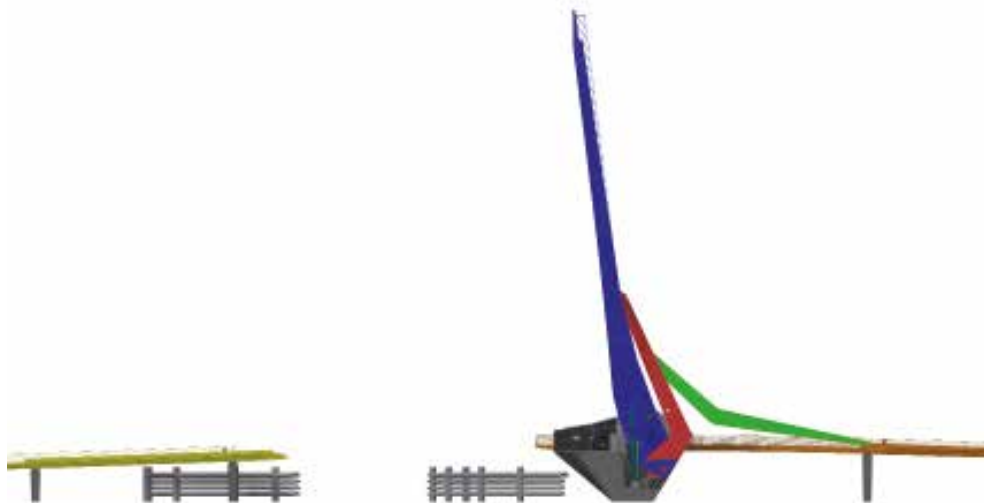
De balans van het val toont in deze configuratie een sterke gelijkenis met een val met scharnierende ballastkist. Er is één belangrijk punt waarop dit systeem hiervan afwijkt: de ballastmast steunt ook in horizontale richting op het draaipunt. De balans van het val wordt dus sterk beïnvloed door de verticale en horizontale steunpuntreactie ter plaatse van het draaipunt van de ballastmast die weer afhankelijk is van de stand van het aanpendelende systeem. De balans van de Prins Clausbrug is daarom minder eenvoudig te bepalen dan bij 'traditionele' basculebruggen en ophaalbruggen, zoals uit de figuren op pagina 25 blijkt. Bij het openen van de brug neemt tot circa 45 graden openingshoek het sluitende moment om de draaias vrijwel niet af, maar



Val 0 graden



Val 45 graden



Val 85 graden

iets toe. Vanaf 45 graden gaat het sluitend moment in een vloeiende beweging omlaag. Dit verloop is karakteristiek voor het mechanisme van de brug en in belangrijke mate bepalend voor de krachten op de aandrijfcilinders van de brug. Ook wordt het bepalen van windbelastingen op de brug ingewikkeld door de beweging van de ballastmast. Deze invloeden zijn daarom in een ANSYS Workbench-model

bepaald en eveneens verwerkt in de berekeningen van de hydraulische aandrijving.

STALEN AANBRUG WEST

De aanbrug aan de westzijde van de beweegbare brug bestaat uit een doorgaande centrale kokervormige hoofdligger van drie overspanningen met lengtes van respectievelijk 9,8 m – 23,7 m – 4,9 m. Aan weerszijden van de hoofdligger bevinden zich

de uitkragende orthotrope rijdekken met een breedte van circa 4,0 m.

De overspanning van 4,9 m bevindt zich voorbij de laatste pijler. In gesloten stand rust het val van de beweegbare brug op deze uitkraging. De voeg tussen val en aanbrug loopt schuin ten opzichte van de rijrichting, evenwijdig aan de doorvaart.

STALEN AANBRUG OOST

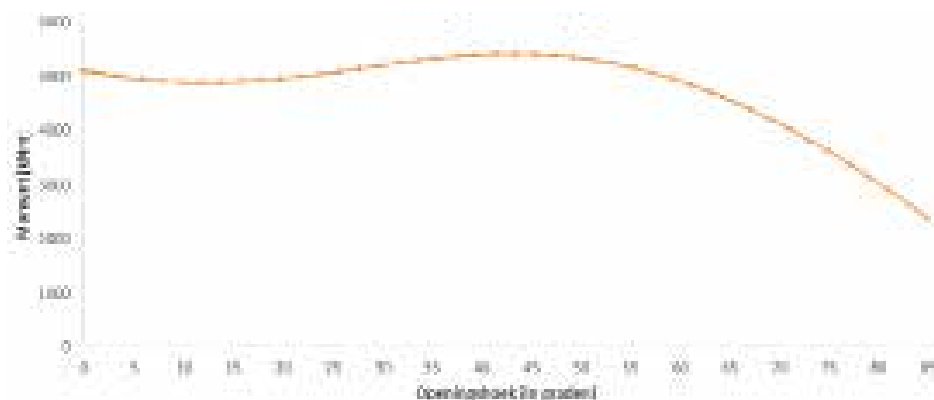
De lengte van aanbrug oost bedraagt circa 60 m. In het bovenaanzicht heeft de vorm van aanbrug oost iets weg van een katapult: ter plaatse van de eerste pijler splitst het dek zich op in twee separate dekken, die om de sokkel heen krullen en aansluiten op de rijdekken van het beweegbare deel. Tussen het oostelijke landhoofd en de eerste pijler is de opbouw gelijk aan die van aanbrug west. Een belangrijk punt van aandacht in het ontwerp van de aanbrug is de uitvoering. De aanbrug is vanwege zijn grote lengte en vormgeving niet in één keer te monteren op locatie. Daarom wordt de constructie in drie delen naar de bouwplaats getransporteerd en ter plekke aan elkaar gelast.

VAL

Het val bestaat net als aanbrug west uit twee orthotrope rijdekken die aan weerszijden uitkragen vanuit een centrale, stijve kern. Anders dan bij aanbrug west bestaat de kern hier uit een set van twee kokervormige hoofdliggers, die door middel van een vakwerk onderling gekoppeld zijn en een vormvast geheel vormen. Voor de staalconstructie zijn vermoeiing van de hoofddragconstructie vanuit het openen en sluiten van de brug en de onder- en overdruk in de luchtdicht afgesloten hoofdliggers in belangrijke mate bepalend geweest voor het vaststellen van de profilering en afmetingen van de constructiedelen. Daarbij vormde het beheersen van de verticale en horizontale vervormingen van het val ter plaatse van de schuine voegovergangen in interactie met de aanbruggen, een belangrijke uitdaging, die tot inventieve oplossingen heeft geleid.

PENDELSTAAF EN BALLASTMAST

De pendel en ballastmast zijn uitgevoerd als dikwandige, kokervormige constructies; het gewicht van het constructieve staal helpt immers mee in de balanceren van de brug. De ballastmast is aan de onderzijde voorzien van een kist die wordt gevuld met stalen knuppels en regelballast. Ook de ballastmastwanden worden gevuld met ingelaste, dikke staalplaten om de benodigde hoeveelheid ballast te realiseren.



VASTE LIGGING VAL

De vaste ligging van het beweegbaar deel wordt volledig door de onbalans gerealiseerd. Het toepassen van een grendel was namelijk onwenselijk.

Naast de verticale windbelasting en het variabele dekgewicht is ook de horizontale windbelasting op de ballastmast en pendel in rekening gebracht voor de toetsing van de vaste ligging van de brug.

De grote onbalans (circa 5100 kNm) beïnvloedt niet alleen de cilinderafmetingen, maar leidt onder andere ook tot hogere vermoeiingsbelasting op de staalconstructies (zie figuur hierboven).

De twee vooropleggingen van het val rusten op de staalconstructie van aanbrug west, die uitkraagt voorbij de pijler. In plaats van een starre ondergrond, wordt de brug ter plaatse van de voorhar dus opgelegd op een flexibele uitkraging. Bovendien hebben beide steunpunten vanwege de schuine voeg verschillende (maar gekoppelde) verticale veerstijfheden. Om ondanks de verschillende stijfheden toch een gelijke verdeling van oplegkrachten vanuit de onbalans van het val te verkrijgen, is ervoor gekozen om één van de twee steunpunten in onbelaste stand door middel van een zeeg iets hoger te plaatsen dan de andere, zodat hier relatief meer permanente belasting naar wordt afgedragen dan wanneer beide steunpunten op gelijke hoogte zouden worden geplaatst.

CONSEQUENTIES SCHUIN KRIJSENDE BRUG

Omdat de brug de vaarweg schuin kruist en zich daarnaast dicht bij een driesprong van rivieren bevindt, is sprake van een bijzondere nautische situatie, waarbij rekening dient te worden gehouden met aanvaarbelastingen.

De pijlers aangrenzend aan de vaarweg worden beschermd middels geleidewerken. Daarnaast zijn alle pijlers op een aanvaarbelasting berekend omdat niet uitgesloten kan worden dat schepen ook achter de geleidewerken de pijlers kunnen raken. Om de pijlers zo slank mogelijk uit te kunnen voeren, wordt de aanvaarbelasting van de aangevaren pijler gedeeltelijk afgedragen naar de aangrenzende pijler. Dit gebeurt via dookconstructies door de bovenliggende aanbrugdekken.

De schuine voeg van de achterhar van het val zit zo ver voor het hoofddraaipunt dat de verticale verschilvormingen bij een open voeg te groot worden. Om de vervormingen binnen de toelaatbare waarden te houden, is gekozen voor een extra steunpunt onder de dekplaat ter hoogte van de schuine voeg. Door de dekplaat van het val los te laten van de hoofdligger ontstaat een flexibele, opgespannen voeg. Bij een uitzonderlijke combinatie van temperatuur en veranderlijke belastingen gaf ook de voeg ter plaatse van de voorhar grotere voegbreedtes dan veilig geacht werd. Door het toepassen van een zogenaamde voeglip, met onder het midden

Onbalans val tijdens bewegen

van de voorhar een extra steunpunt met speling, kon de voeg ondiep gehouden worden en werd een grotere voegbreedte toelaatbaar geacht.

DRAAIPUNTEN

Om de bijzondere bewegingen van de bewegende delen van de brug (het val, de ballastmast en de pendelstaaf) bij openen en sluiten van de brug mogelijk te maken, zijn de delen onderling en met de 'vaste wereld' scharnierend verbonden (zie fig. hieronder). De bewegende delen draaien bij het openen en sluiten van de brug om de volgende draaipunten:

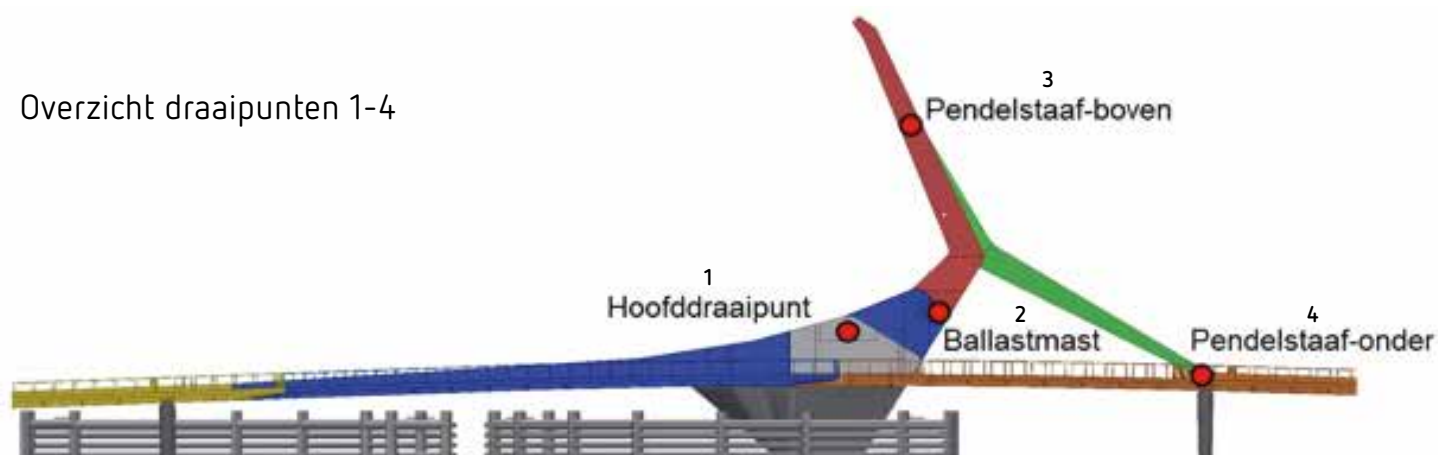
- 1 De twee draaipunten waarom het val draait op de betonnen consoles op de kelderpijler, deze worden ook wel de hoofddraaipunten genoemd.
- 2 De twee draaipunten waarmee de onderzijde van de ballastmast is verbonden met de staart van het val.
- 3 Het draaipunt waarmee de pendel aan de bovenzijde is verbonden met de ballastmast.
- 4 Het draaipunt waarmee de pendel is verbonden met de oostelijke aanbrug.

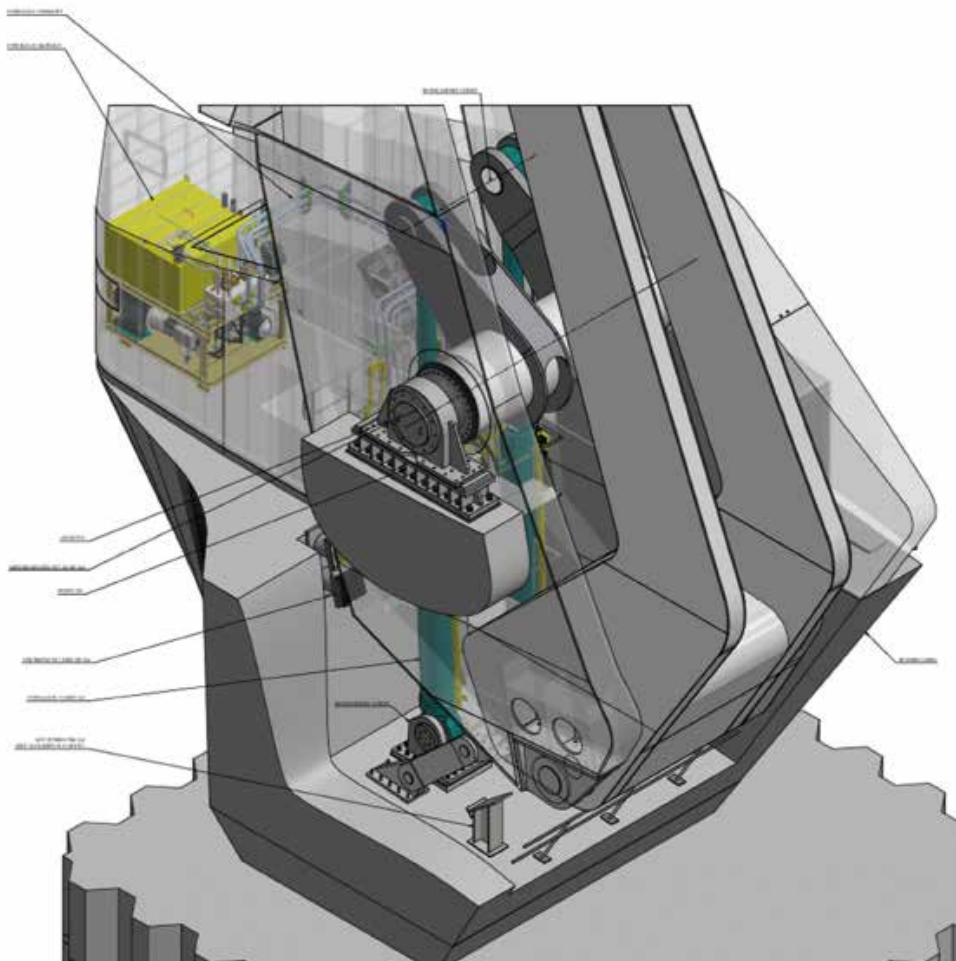
Omdat de draaipunten elk hun eigen specifieke toepassing en inpassingsproblemen kennen, zijn de draaipunten verschillend uitgevoerd. De draaipunten worden daarom afzonderlijk toegelicht.

HOOFDDRAAIPUNT VAL (1)

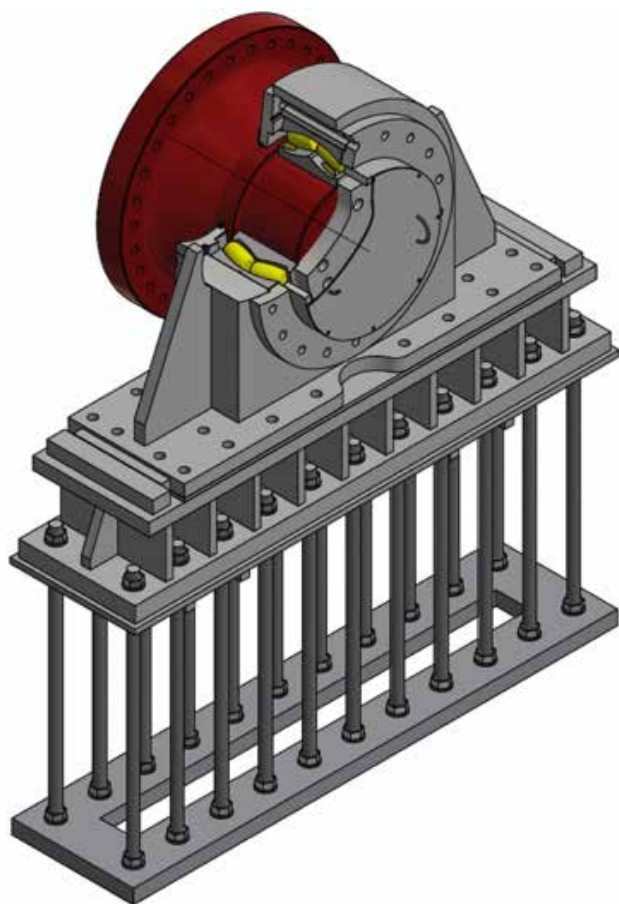
De draaipunten waarmee het val met de betonnen kelder is verbonden, worden het zwaarst belast van alle draaipunten en zijn voorzien van zelfinstellende tweerijige tonlagers, een robuust en zwaar belastbaar type wentellager. Dergelijke wentellagers

Overzicht draaipunten 1-4





Overzicht mechanische uitrusting hoofddraaipunt 1



Detail hoofddraaipunt 1 - scharnierpunt met zelfinstellende, tweerijige tonlagers.

hebben als voordeel dat zij een zeer lage rolweerstand hebben (de wrijvingsfactor μ_r bedraagt circa 0,002), waardoor weinig energie verloren gaat door wrijving en de aandrijfkraften en energiebehoefte voor het bewegen van de brug zo beperkt mogelijk gehouden kunnen worden. De draaipunten zijn aan de buitenzijde van de hoofdliggers van het val aangebracht, de lagers zijn elk gemonteerd op een smeedstalen astap met flens, bevestigd op een smeedstalen ring, gelast in de hoofdligger. Een koppelbuis tussen de smeedstalen ringen neemt de buigende momenten ten gevolge van de lagerkrachten op, zodat deze niet de zijwanden van de hoofdliggers belasten. De lagers zijn opgenomen in een lagerhuis op een onderstoel die is verankerd aan de betonnen consoles aan de buitenzijden van de hoofdliggers van het val. Om de draaipunten in de gewenste vormgeving op te kunnen nemen, zijn de lagerhuizen en de onderstoelen zo smal mogelijk uitgevoerd, zodat ze goed passen op de smalle betonnen consoles en de daarover nauwsluitende stalen kappen. De kappen zijn voorzien van wegneembare deksels om de lagers te kunnen inspecteren en (in geval van falen) te kunnen vervangen.

DRAAIPUNT BALLASTMAST – VAL (2)

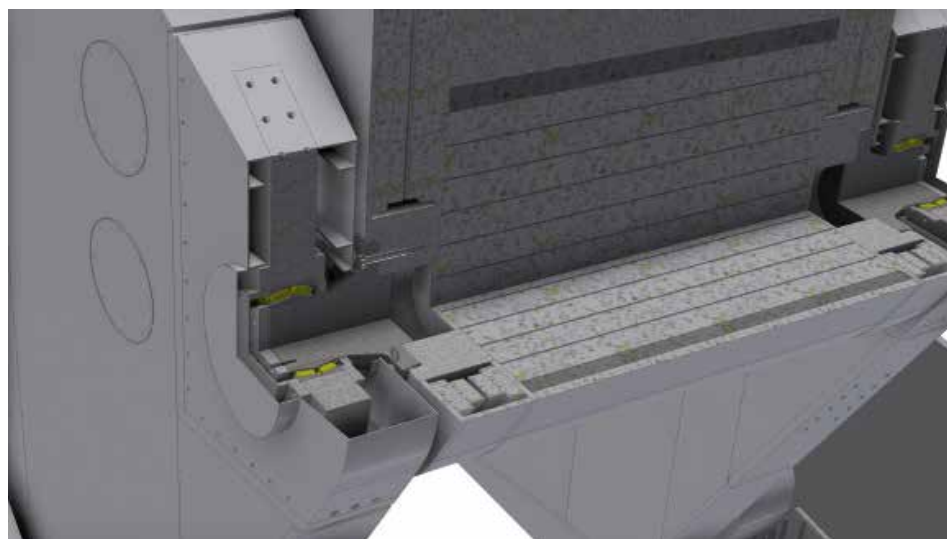
Ook deze draaipunten worden zwaar belast, met de grote massa van de ballastmast (ruim 300 ton) dat vrijwel geheel door deze draaipunten wordt gedragen. Om dezelfde redenen als bij de hoofddraaipunten zijn ook hier zelfinstellende tweerijige tonlagers toegepast (zie pagina 28 linksboven).

De draaipunten zijn aan weerszijden van de ballastmast aangebracht, beide lagers zijn gemonteerd op een smeedstalen astap met flens, bevestigd op een smeedstalen ring. De smeedstalen ring is gelast in de lijfplaten van de hoofdligger van de ballastmast. Ook voor deze draaipunten geldt dat de beschikbare ruimte in breedterichting voor het onderbrengen van een lagerhuis beperkt is, omdat deze moet passen binnen de contouren van de staart van het val. Het lagerhuis is met een flensverbinding verbonden met de achterzijde van de staart;



Draaipunt 2 ballastmast - val

Aangezien de lagerkrachten hier veel lager zijn dan bij de eerdergenoemde draaipunten, speelt lagerwrijving bij dit draaipunt ook een minder belangrijke rol in de totale bewegingsweerstand van de brug. Om deze reden is hier een glijlager gekozen dat weliswaar een hogere wrijvingsweerstand heeft dan wentellagers (μ_f bedraagt circa 0,10-0,15), maar robuust en compact is en minder onderhoudsgevoelig.



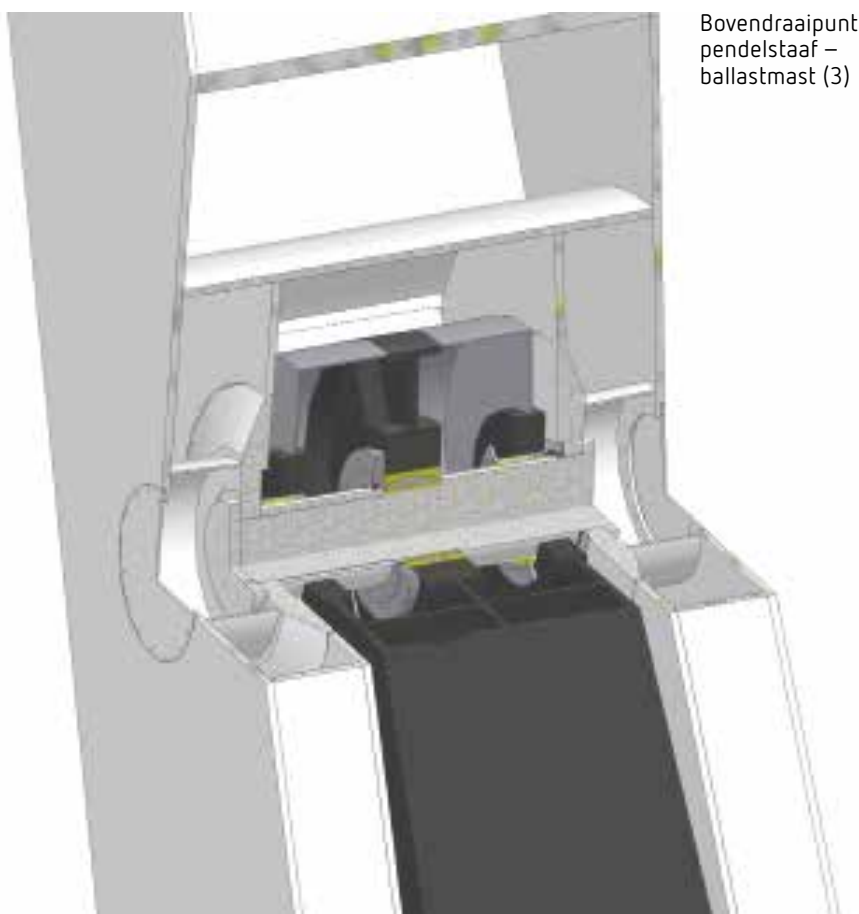
Doorsnede draaipunt 2 ballastmast - val

Omdat het bolscharnierlager zelfinstellend is, kan het (kleine) afwijkingen van de beweging haaks om de draaias faciliteren. Op deze wijze wordt bereikt dat radiale krachten altijd centrisch in het lager aangrijpen en dat kleine zijdelings bewegingen van de pendelstaaf, bijvoorbeeld door temperatuursvervormingen en windbelastingen, niet leiden tot grote wrikkrachten op lager, as en pendelstaaf. Om de bewegingsvrijheid van de pendelstaaf zijdelings beperkt te houden, is de as waar de pendelstaaf om roteert voorzien van twee halve VVK-glijschalen die rotatiebewegingen van de pendelstaaf om haar eigen as tot een halve graad beperkt houdt, om 'slingeren' van de pendelstaaf (vergelijkbaar met de zijwieltjes van een kinderfiets) en de daarmee gepaard gaande schade te vermijden. De as van het draaipunt is dusdanig getrap

na montage van het lagerhuis wordt het lagerhuis afgeschermd van de buitenwereld door een wegneembare stalen kap die de vloeiende contouren van de hoofdligger van het val voltooit. Om vervangbare, voorgespannen bouten toe te kunnen passen is het noodzakelijk de bouten aan weerszijden van de flensverbinding bereikbaar te houden. Om deze reden zijn wegneembare deksels aangebracht in de buitenste zijplaten van de hoofdligger om toegang te verschaffen tot de boutverbinding.

BOVENDRAAIPUNT PENDELSTAAF – BALLASTMAST (3)

De verbinding tussen ballastmast en pendelstaaf bestaat uit één centraal bolscharnierlager, een zelfinstellend type glijlager, met vezelversterkte kunststofvoering (VVK-voering), aangebracht in het hart van de pendelstaaf/ballastmast.



Bovendraaipunt pendelstaaf – ballastmast (3)

uitgevoerd dat het vanaf één zijde van de ballastmast is te monteren. Aan weerszijden van de ballastmast zijn deksels aangebracht om de kopse kanten van de as bereikbaar te maken voor (de)montagewerkzaamheden en inspectie.

ONDERDRAAIPUNT (4) PENDELSTAAF – AANBRUG OOST

De verbinding tussen de pendelstaaf en aanbrug oost bestaat net als bij het bovendraaipunt van de pendelstaaf uit één centraal bolscharnierlager met een VVK-voering, in het hart van de pendelstaaf. Ook hier zijn de lagerkrachten relatief laag en speelt lagerwrijving geen rol van betekenis in de bewegingsweerstand van de brug. Het lager is opgenomen in een stoel gemonteerd op de stalen aanbrug. Evenals bij het bovenste draaipunt zijn de kopse kanten van

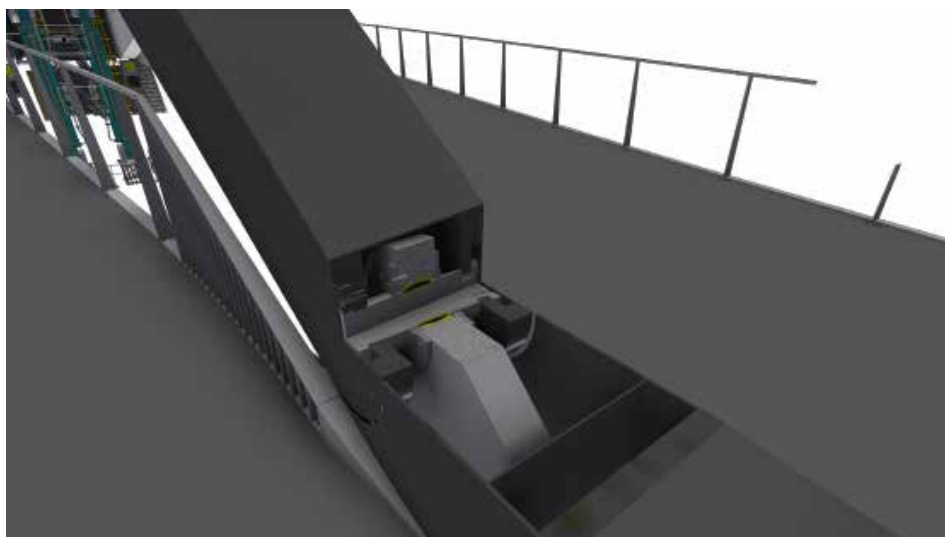
de as van de buitenwereld afgeschermd met wegneembare stalen deksels.

BRUGAANDRIJVING

De brug wordt aangedreven door een elektro-hydraulische aandrijving die bestaat uit twee hydraulische cilinders en een elektro-hydraulisch pompaggregaat. De cilinders zijn aan het val en de kelderbodem gekoppeld door middel van twee scharnierpunten die zijn uitgevoerd met VVK-bolscharnierlagers. De cilinders zijn daartoe uitgevoerd met een bodemoog en stangoog, waarin de lagers zijn opgenomen. Glijgeleidingen op zowel het bodem- als het stangoog beperken de rotatievrijheid van de cilinder en stangkop om de cilinderas. Het stangoog is door middel van een scharnierpen gekoppeld aan twee wangplaten, verbonden met de koppelbuis tussen de hoofdliggers van het val. Het

bodemoog is scharnierend verbonden met de twee wangplaten van de gelaste cilinderonderstoel die aan de keldervloer is verbonden met voorgespannen ankers. Om de krachten in normaal brugbedrijf zo goed mogelijk te verdelen over beide cilinders, zijn deze zowel aan bodem- als aan stangzijde hydraulisch gekoppeld, waardoor ze als het ware als één cilinder bewegen. Dit maakt een gelijkloopregeling voor de aandrijving overbodig en zelfs ongewenst. Het in- en uitsturen van de cilinders is gebaseerd op een halfgesloten hydraulisch systeem zonder toepassing van een remventiel. De brugbeweging wordt voor zowel openen als sluiten van de brug via een vloeiend verlopend snelheidsdiagram geregeld, waarbij de bewegingssnelheid van de cilinders volledig wordt bepaald door de traploos regelbare pomppompbrengst van het aggregaat. Op deze wijze wordt de brugbeweging op een beheerste en stabiele wijze bestuurd.

Bij (incidenteel) hoogwater kunnen de keldervloer en de voet van beide cilinders die daarop afgesteund zijn, onder water komen te staan. Om het draaipunt aan de cilinderbodenzijde voldoende tegen hoogwater te beschermen is deze voorzien van een dubbele afdichting en volledig met vet gevuld. Langdurige onderdompeling van het draaipunt zal hierdoor niet leiden tot schade aan as en lager door waterindringing en corrosie. De cilinder zelf is voorzien van een speciale coating, geschikt voor onder water.



Draaipunt 4 draaipunt pendelstaaf onder

PROJECTOVERZICHT

Prins Clausbrug, Dordrecht (2020)	
Opdrachtgever	Gemeente Dordrecht
Vormgeving	René van Zuuk Architecten b.v., Almere
Adviseur beweegbare bruggen	Michel Koop, Iv-Infra b.v.
Ontwerper stalen bovenbouw en mechanische uitrusting	Michael Limburg, Iv-Infra b.v.
Constructeur stalen bovenbouw	Arjen Zorgdrager, Iv-Infra b.v.
Constructeur mechanische uitrusting	Dirk van der Poel, Iv-Infra b.v.
Aannemer	Combinatie Dura Vermeer / Hillebrand, Rotterdam

De cilinder zelf is voorzien van een speciale coating, geschikt voor onder water.

PARAMETRISCHE OPZET 3DPB-BRUG¹

Karel van Dongen MSc, ir. Johan Bolhuis RO | BAM Infraconsult
ir. Herman Oogink, Gino Vanstraelen | SCIA

Dankzij ontwikkelingen als parametrisch ontwerpen en 3D-printen in beton (3DPB) is het mogelijk om zowel het ontwerp- als het productieproces van betonconstructies te automatiseren. In de praktijk wordt daar al veel ervaring mee opgedaan. Een belangrijke stap is het koppelen van een parametrisch ontwerpmodel aan een eindige-elementenanalyse (EEA). Als testcase van die koppeling is de 3DPB-brug in Gemert gebruikt, waarbij gebruik is gemaakt van de combinatie Rhinoceros en Grasshopper voor het parametrische model, SCIA Engineer voor de EEA en Python voor het automatiseren van het proces.



In beton geprinte brug in Gemert

¹ Onderstaand artikel is eerder gepubliceerd in *Cement*. Omdat het een afstudeeronderzoek betreft, dat lezers van Bruggen Young zal interesseren, is voor publicatie binnen deze rubriek gekozen om een breder publiek te kunnen bereiken. Red.

De mate van automatisering van processen in de bouwwereld loopt achter op andere industrieën. Dit heeft te maken met een complex systeem van onderling afhankelijke activiteiten en processen [1]. Dit heeft geleid tot vergaande specialisatie met een scheiding tussen ontwerp en uitvoering.

Door recente ontwikkelingen in de bouwsector, zoals Building Information Modeling (BIM) en Computer-Aided Design/Engineering (CAD/CAE), kunnen de complexe relaties binnen het bouwproces tegenwoordig goed in kaart worden gebracht. Het wordt mogelijk de ontwerpinput parametrisch te koppelen aan voorspellingen voor de output, waarmee het ontwerpproces kan worden geautomatiseerd. In combinatie met het onlangs ontwikkelde 3D-printen van beton is het mogelijk om een dergelijk geautomatiseerd ontwerpproces te koppelen aan een geautomatiseerd productieproces. Deze opzet kan worden gezien als één van de eerste beginselen van een op BIM gebaseerd geautomatiseerd bouwproces.

In dit artikel wordt de koppeling beschreven tussen een geautomatiseerd, parametrisch ontwerpmodel voor een 3D-geprinte betonnen (3DPB) brug en een EEA model. Hierbij worden de CAD/CAE-programma's Rhino 5.0 en Grasshopper 0.9.0076 gebruikt. Voor het EEA-model wordt SCIA Engineer 17.01 gebruikt. De opzet van het model en de referentiewaarden zijn gebaseerd op de 3DPB-brug in Gemert (zie foto blz. 30), gerealiseerd door o.a. BAM Infra en TU Eindhoven.

STAP 1: PARAMETRISCHE OPZET GEOMETRIE

Vóór het model wordt opgezet, is het verstandig te beginnen met het definiëren van wat de gewenste output is van het model, ofwel de "simulatie-intentie". Door de simulatie-intentie vooraf te bepalen kan tijd worden bespaard op het ontwikkelen en bij het gebruik van het model [2].

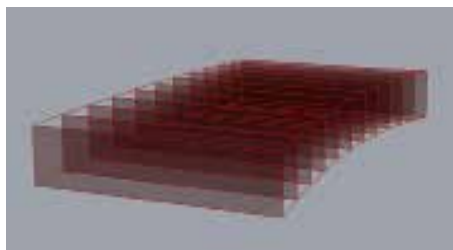
Het doel van het parametrische model is, in het project beschreven in dit artikel, het genereren van een 3D model waaruit dwarsdoorsnede-eigenschappen berekend kunnen worden en het visualiseren van de geometrie.

Het model dat is beschreven in dit artikel, maakt gebruik van een vergelijkbare geometrie en doorsnede als het ontwerp van de 3DPB in Gemert (zie pagina 30). Het modelleren van – en het rekenen met – de

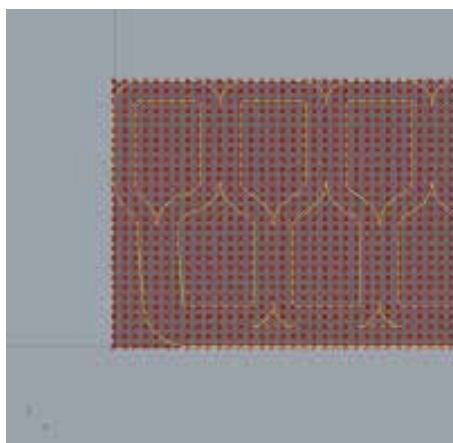
exakte doorsnede van de Gemert-brug is een tijdrovend proces. Om die reden gaat het model uit van een simplificatiemethode die gebaseerd is op een gesimplificeerde weergave van de doorsnede. Dit houdt het volgende in (fig. 1a, b en c):

- 1a Identificeren van de hoekpunten van de doorsnede. Deze worden gebruikt voor het opzetten van een rechtlijnige vorm van de doorsnede (simplificatie).
- 1b Het verbinden van de hoekpunten om de doorsnede te visualiseren. Deze doorsnede wordt geplaatst op een aantal locaties in de overspanningsrichting om de doorsnedewaarden te bepalen (deze kunnen variëren door het aanpassen van de globale geometrie).
- 1c Gesimplificeerde weergave van het representatieve model dat kan worden gebruikt voor analyse in SCIA Engineer. Het representatieve model gebruikt afmetingen gebaseerd op de dwarsdoorsnede-eigenschappen van het print pad maar dan zonder uitsparingen.

Deze opzet van het model komt overeen met de simulatie-intentie: het eindresultaat wordt gevisualiseerd en de doorsnede-waarden worden bepaald op verschillende punten in de spanrichting. In dit artikel ligt de nadruk op de koppeling met een EEA waardoor de geometrie niet verder wordt beschreven.



1a Identificatie van hoekpunten



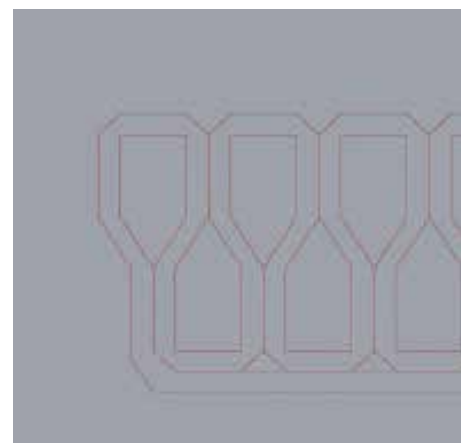
1b Gesimplificeerde weergave van de doorsnede

STAP 2: KOPPELING MET EINDIGE ELEMENTENANALYSE

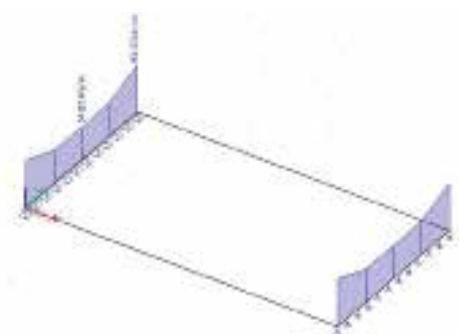
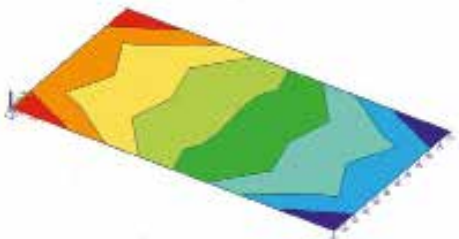
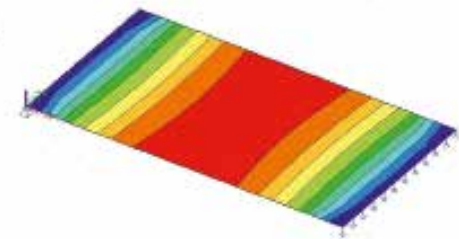
Voor de koppeling met een EEA-softwarepakket is het van belang de benodigde input te bepalen. Het model dat wordt beschreven in dit artikel, wordt lineair-elastisch berekend als een plaatligger op twee steunpunten. Voor de analyse in SCIA Engineer is het noodzakelijk de volgende informatie te specificeren:

- 1 algemene informatie over opzet van het model (vrijheidsgraden) en de gehanteerde norm (Eurocode);
- 2 materiaaleigenschappen die worden gebruikt in het model;
- 3 belastingcombinaties en waarden van de belasting op het model;
- 4 knopen die worden gebruikt om vlakken te definiëren;
- 5 elementen, welke knopen per element en welke materiaaleigenschappen;
- 6 type oplegging met betrekking tot de restrictie van vrijheidsgraden van de plaat.

In het parametrische model wordt de bovenstaande informatie gegenereerd, met behulp van aanpasbare input, op basis van het gesimplificeerde model. De belastingen en de belastingcombinaties op het brugdek worden gedefinieerd op basis van de geldende normen. De knopen en plaalementen worden gegenereerd door het model in stukken te delen en deze stukken te specificeren als onderling stijf verbonden platen.



1c Solide weergave van het representatieve model voor EEA



2 van boven naar onder
Moment verdeling – Dwarskracht verdeling –
Opleg krachten [Gegenereerd in SCIA
Engineer]

Als de benodigde informatie is gegenereerd, wordt deze informatie gesorteerd en in XML-formaat gestructureerd. Daarna wordt het volledige model weggeschreven in een XML-bestand. Dit bestand kan daarna door SCIA Engineer worden ingelezen. Dit proces is volledig geautomatiseerd in Grasshopper met behulp van een Python plug-in. Hierin wordt achtereenvolgens het XML-bestand geschreven en SCIA Engineer aangeroepen om dit rekenmodel in te laden en te berekenen. Na het doorrekenen van de constructie worden de moment- en dwarskrachtverdeling in de spanrichting en de oplegkrachten en momenten gegenereerd (fig. 2). Al deze stappen staan beschreven in de Python-module.

Om het exporteren van het XML-bestand te automatiseren kan in Python 2.7 de 'operating system' module worden gebruikt. De juiste datastructuur kan worden gedefinieerd door gebruik te maken van de

'codecs' module in Python 2.7. Na het exporteren van het XML-bestand kan het worden ingelezen in SCIA Engineer. Het voordeel van het importeren met XML is dat het model direct wordt opgezet aan de hand van de gespecificeerde onderwerpen. Hierdoor is het niet nodig handmatig verdere informatie in te voeren met behulp van de SCIA Engineer interface. Uiteraard moet dan wel het XML-bestand correct en volledig zijn opgesteld.

STAP 3: AUTOMATISEREN VAN DE KOPPELING TUSSEN EEA EN GRASSHOPPER

SCIA Engineer kan worden gebruikt als 'rekenkernel' om de link tussen Grasshopper en de EEA te automatiseren. Dat wil zeggen dat de EEA wordt aangeroepen zonder interface en dat het programma kan worden aangestuurd met commando's. Door het gebruik van commando's kan een standaardbestand (template) worden geopend waarin het XML-bestand, beschreven in de vorige stap, wordt ingeladen zonder handmatige input. SCIA Engineer gebruikt een lijst met commando's voor verschillende typen analyse waaronder een lineair-elastische berekening, die in het beschreven model wordt gebruikt. Na het uitvoeren van de analyse moet worden gespecificeerd hoe de uitvoer van de resultaten wordt weggeschreven. Dit kan in een SCIA Engineer bestand maar ook in andere bestandsformaten zoals XML, HTML en TXT.

In totaal zijn er vier commando's nodig voor een analyse in SCIA Engineer zonder interface:

- 1 een beginbestand (templatefile),
- 2 een XML-bestand met invoer,
- 3 een analysetype en
- 4 een uitvoerbestand.

Een manier om de commando's achter elkaar uit te laten voeren is het gebruik van een CMD-file (bestand waarin een aantal computercommando's zijn geplaatst die na

elkaar worden uitgevoerd), waarin de gewenste reekscommando's in volgorde staan beschreven (fig. 3).

STAP 4: INTERPRETATIE RESULTAAT

Omdat het model een gesimplificeerde versie is van de realiteit, is het noodzakelijk de verkregen resultaten uit de analyse te verwerken. In het proces, zoals beschreven in dit artikel, is dat gedaan in Grasshopper. De waarden gegenereerd in de EEA worden geëxporteerd als interne plaatkrachten in de knooppunten van het Eindige-Elementen Mesh. Dit wil zeggen dat de resultaten plaatsgebonden zijn en een intensiteit aangeven per eenheid lengte van de elementen in het EEM. Om die reden is de eerste stap het verkrijgen van de waarden van de representatieve krachten op het model (zie vergelijking 1).

$$M_{i,j} = m_{x,i,j} \times b_{i,j}$$

$$V_{i,j} = v_{x,i,j} \times b_{i,j}$$

$$R_{xi} = \frac{\sum_{j=1}^n [(v_{x,i,j} + v_{x,i,j+1}) \times b_{i,j}/2]}{\sum_{j=1}^n b_{i,j}}$$

Vergelijking 1; van boven naar beneden
– Rep. waarde moment – Rep. waarde dwarskracht – Rep. waarde van de reactiekracht [alle op locatie i en sublocatie j]. [b]=breedte van het element, [M]=moment, [V]=dwarskracht en [R]=reactiekracht

De waarden van de representatieve krachten op het model kunnen worden gebruikt om de spanning in de doorsneden te bepalen. Naast de krachtverdeling is de spanning in de doorsnede afhankelijk van de na-spanning in het model, het traagheidsmoment van de doorsnede, de excentriciteit van de doorsnede en de excentriciteit van de na-spanning. De waarden van de spanning moeten worden geverifieerd in de uiterste vezels, aan de boven en onderkant, van de

```
> set esaprog="SPECIFY THE LOCATION OF THE esa_xml.exe FILE"
> C:
> cd "FILE DIRECTORY OF XML FILE AND OUTPUT"
>
> %esaprog% NOC "_Template.esa" "SCIA Export.xml" -o"GH_Model.esa"
> %esaprog% LIN "GH_Model.esa" -o"GH_Model_Results.esa"
> %esaprog% NOC "GH_Model_Results.esa" -tTXT -o"GH_Model_Results.txt"
```

3 Voorbeeld van een CMD-bestand voor het automatisch uitrekenen van het gegenereerde xml bestand aan de hand van de beschreven commando's. [NOC=geen berekening, LIN=lineair elastisch]

doorsneden in alle knopen van het EEM. Indien de breedte van de plaat kleiner is dan de helft van de lengte, dan kan een min of meer constant spanningsverloop worden verwacht over de breedte van het tweezijdig opgelegde model (zie vergelijking 2). Indien de plaat niet voldoet aan dit criterium of meer opleg- punten/zijdes heeft dient ook het verloop in de breedte te worden bepaald [3].

$$\sigma_{xi,j} = \frac{P_m}{A_{ci,j}} + \frac{P_m \times z_i \times a_{pi}}{I_{ci,j}} + \frac{M_i \times z_i \times a_{pi}}{I_{ci,j}} \geq f_{cd}$$

$$\sigma_{xi,j} = \frac{P_m}{A_{ci,j}} + \frac{P_m \times z_i \times a_{pi}}{I_{ci,j}} + \frac{M_i \times z_i \times a_{pi}}{I_{ci,j}} \leq f_{td}$$

Vergelijking 2; van boven naar beneden – Spanning in het model is groter dan de maximaal toelaatbare drukspanning in het model (druk is negatief) – Spanning in het model is lager dan de maximaal toelaatbare trek in het model (trek is positief). [P]=na-spanning in kN, [A]=oppervlakte van de doorsnede in m², [z]=hoogte coördinaat van de vezel in m, [e]=excentriciteit na-spanning en [I] is het traagheidsmoment. Allen op locatie i in de overspanningsrichting.

NAUWKEURIGHEID VAN DE RESULTATEN

De waarden verkregen uit het model moeten worden geverifieerd aan de hand van referentie-projecten. In dit geval het referentiemodel en rapport van de 3DPB-brug in Gemert [4]. De extreme waarden uit het model worden vergeleken met de gecontroleerde waarden uit het referentieproject (fig 4). Aan de hand van deze vergelijking kan de nauwkeurigheid van het model worden bepaald. De resultaten van de vergelijking tonen aan dat het beschreven model waarden genereert die de referentiewaarden nauwkeurig benaderen en aan de veilige kant zijn. Dit wil zeggen dat de resultaten uit het model minder gunstig zijn dan de referentie waarden, wat resulteert in een betere uitnutting van het materiaal. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het beschreven model resulteert in een veilige benadering van de kracht- en spanning-verdeling in het ontwerp..

De spanning in de onderste vezel van de doorsnede wijkt meer af van de referentie-

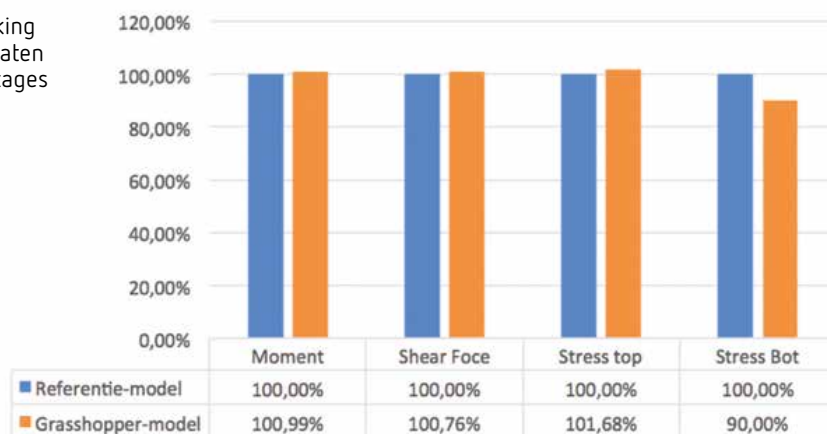
waarde dan de andere waarden. Dit heeft te maken met de lage waarden van de lokale spanning. Een van de eisen aan het beschreven model is namelijk dat er geen trekspanningen mogen voorkomen in de doorsnede. Hierdoor is de optimale waarde van de spanning in de onderste vezel een negatief getal zo dicht mogelijk bij nul. Omdat de spanning in de onderste vezel een waarde dichtbij nul heeft, is de procentuele afwijking hoger in vergelijking met andere waarden.

CONCLUSIES EN DISCUSSIE

Aan de hand van de vier stappen beschreven in dit artikel is een geautomatiseerd ontwerp- en analysemodel gemaakt voor een 3D-geprinte betonnen brug. De waarden die het beschreven model genereert, zijn getoetst met een referentieproject, namelijk de 3D-geprinte betonnen brug in Gemert. In vergelijking met het referentieproject blijken de resultaten een veilige benadering te zijn van de kracht- en spanning-verdeling in het ontwerp. Hierdoor kan worden geconcludeerd dat de beschreven methodiek correct is en resulteert in een veilige berekening.

Het exacte materiaalgedrag kan echter niet worden bepaald met het model. Dit komt door de complexiteit van de doorsnede van het oorspronkelijke model. Ten behoeve van simplificatie is gekozen om het model te analyseren als een aaneenschakeling van 2D platen met variërende afmetingen in de richting van de overspanning. Om het exacte materiaalgedrag te analyseren moet de exacte vorm van de doorsnede worden geconverteerd naar een eindige-elementenmodel, inclusief de inhomogene vorm/samenstelling van de doorsnede en het materiaal.

4 Vergelijking van resultaten in percentages



De methodiek beschreven in dit artikel, kan worden gebruikt om het proces en de benodigde stappen te automatiseren en te besturen vanuit één software-interface. Een mogelijke vervolgstap kan zijn het koppelen van dit model aan optimalisatie-algoritmes. Die kunnen aan de hand van de input en een optimalisatiecriterium een optimale combinatie tussen parameters genereren. Met deze vervolgstap wordt het mogelijk het bouwproces aan te sturen vanuit één software-interface in de optimale samenstelling, gebaseerd op het criterium van de opdrachtgever. In combinatie met 3D-printen van beton kan deze methode worden gebruikt als aanloop naar het automatiseren van het totale bouwproces.

Echter, hiervoor is meer onderzoek nodig naar de combinatie tussen ontwerpproces & bouwproces, het automatiseren van het geheel, het optimaliseren van het proces en de nauwkeurige analyse van complexe vormen.

REFERENTIES

- 1 Dubois, A. and L.-E. Gadde, *The construction industry as a loosely coupled system: implications for productivity and innovation*. Construction Management & Economics, 2002. 20(7): p. 621-631.
- 2 Nolan, D.C., et al., *Defining simulation intent*. Computer-aided design, 2015. 59: p. 50-63.
- 3 Blaauwendraad, J., *Theory. Plate analysis, theory and application*. Vol. 1. 2006, Delft: Technical University Delft. 96.
- 4 Uitvoeringsontwerp van de 3DCP brug Gemert, 24/07/2017 kenmerk 100640 / 17-010.181. 2017: Witteveen+Bos, Deventer.



ST. PHILIPS FIETS+VOETGANGERS- BRUG IN BRISTOL

EEN ORIGAMI SCULPTUUR BRENGT
TWEE WERELDEN SAMEN

Maria Selkou



Aanzicht brug vanuit het ZW (© Lance McNulty)

EEN TOEVOEGING AAN DE BRISTOL BRUGGENLOOP

Bristol staat bekend om haar bruggenloop, een wandeling waarin iedereen wordt uitgedaagd elke brug binnen Bristol slechts éénmaal over te steken. Recentelijk is hier de St. Philips voetgangersbrug aan toegevoegd, die met een 50 meter overspanning de rivier de Avon overbrugt. De St Philips verbindt hiermee het westelijke industriegebied met het Temple eiland in het oosten.

De eerste verbinding met het eiland werd aangelegd in 1841 in de vorm van een spoorbrug. Deze boogbrug was onderdeel van een groter infrastructureel plan om Londen en Bristol met elkaar te verbinden.

TWEE WERELDEN SLECHTS 50 METER UIT ELKAAR

De stad Bristol heeft sinds lange tijd het plan om Temple Island nieuw leven in te blazen. Eén van de projecten is de uitbreiding van de universiteitscampus op het eiland. Met het oog op verdere uitbreiding van het eiland heeft Knight Architects de opdracht gekregen om een nieuwe fiets'voetgangersbrug te ontwerpen om hiermee de bereikbaarheid van het eiland te vergroten. Het resultaat is een stalen brug met een overspanning van ongeveer 50 meter. Het landhoofd aan de westzijde van de brug ligt verscholen achter de stenen muur. Halverwege de overspanning splitst de brug in twee delen. Het zuidelijke gedeelte gaat verder als een stalen trap. Het noordelijke gedeelte buigt af in de vorm van een helling voor zowel fietsers als minder validen. Deze splitsing was noodzakelijk, maar maakt de constructie op deze manier bijzonder uitdagend.

Senior architect Hector Beade-Pereda: "Het ontwerp lag al vanaf het begin van het proces vast". De brug zou bestaan uit een slanke

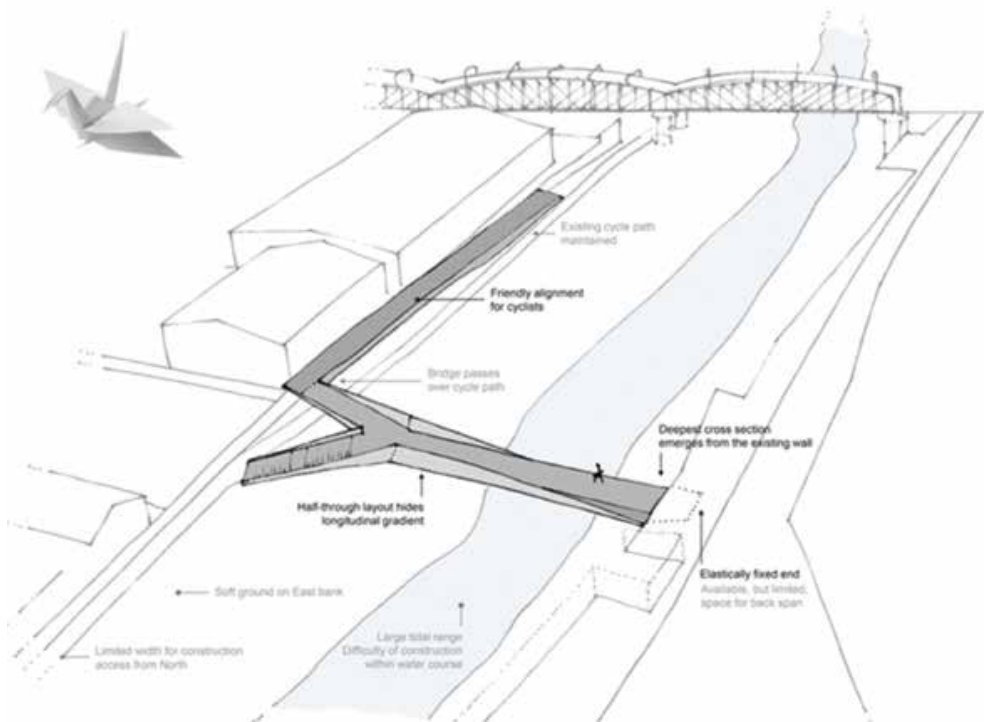
plaat met een bescheiden vorm om op deze manier volledig op te gaan in de omgeving. Zowel de opvallende vormen van de nabijgelegen boogbrug als de futuristische skyline van Temple Meads zijn door de architect meegenomen in het ontwerp. Nog een opvallende brug zou volgens de architect misstaan in de omgeving en deze wens is door de constructeur meegenomen in het uiteindelijke ontwerp, rekening houdend met zowel de kosten als de uitvoerbaarheid.

DESIGNING WITH CONTEXT

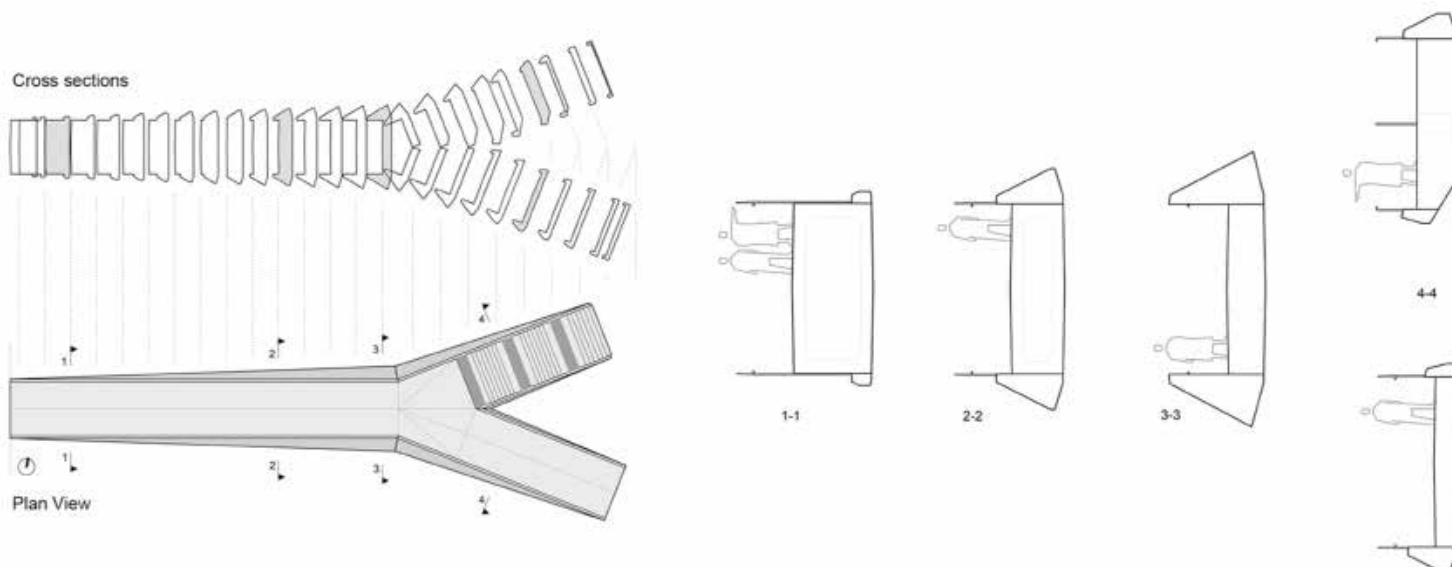
Het hoogteverschil tussen beide oevers vereiste enige aandacht. Niet alleen moest worden voldaan aan de constructieve eisen, ook moest de oversteek zijn elegante vorm

behouden. Om die reden moest de architect er zeker van zijn dat de visuele impact van een hellend vlak tot een minimum wordt beperkt. Het verloop van de deksecties in langsrichting laat zien dat de architect erin geslaagd is een overwegend horizontale vorm te behouden terwijl de dikte van het dek continu verandert. De witte randelementen verbergen op een verfijnde manier dit verloop in dekkdikte.

De beperkte ruimte aan de oostzijde van de rivier en een doorlopend voetpad aan de westzijde zijn verdere eisen die door de stad zijn opgelegd. Bovendien moest de brug begaanbaar zijn voor iedereen, zonder hierbij veiligheid en zichtbaarheid uit het oog te verliezen. Om deze reden is gekozen de brug



Ontwerpeisen en omgevingsfactoren



Dwarsdoorsneden met het geometrische verloop van het staalwerk



Plaatsing brugdek

aan de oostzijde op te splitsen in een trapgedeelte en een helling om zo een maximale toegankelijkheid te garanderen. De oostelijke oever bestaat uit een minder draagkrachtige ondergrond en biedt hierdoor extra uitdaging. De oplossing lag in een paalfundering, een kostbare maar noodzakelijke ingreep. Daarbij is de westelijke muur onderdeel van het Victoriaans erfgoed. De noodzaak voor een eenvoudig ontwerp werd steeds duidelijker.

VAN ONTWERP NAAR UITVOERING

De brug is in delen gebouwd, waarna deze per vrachtwagen naar de bouwplaats zijn

vervoerd. Hier is de brug, op Temple Island, in elkaar gezet en vervolgens als een geheel op zijn plek gehesen. Hiervoor is gebruik gemaakt van een mobiele kraan met een maximum capaciteit van 750 ton. De ruimte rondom de bouwplaats is speciaal vrijgemaakt voor de plaatsing van de brug. Het grote gewicht van de torenkaan zorgde er voor dat de kraan niet dichtbij de oever geplaatst kon worden. Maatregelen zijn genomen om het risico op bezwijken van de Victoriaanse muur te beperken.

Het geometrische uiterlijk van de brug is scherp gedefinieerd, bijna grafisch. Het gebruik van contrasterende kleuren benadrukt de esthetische en structurele

keuzes van de ontwerpers en zorgt voor een schoon, sculpturaal gebaar, dat het heden met de toekomst verbindt. De constructieve en architectonische vorm van de brug zijn samengevoegd en vertegenwoordigen de contextuele beperkingen, maar ook de toekomstige ontwikkelingen. Kortom, een geweldige uitdaging over hoe te ontwerpen ondanks, of misschien dankzij, de beperkingen van de locatie.

Literatuur

<https://www.bristol.ac.uk/temple-quarter-campus/>

<https://www.bristoltemplequarter.com/wp-content/uploads/2016/10/Temple-Quarter-Heritage-Assessment.pdf>

<https://www.bbc.com/news/uk-england-bristol-47895015>

<https://www.dezeen.com/2018/08/24/zaha-hadid-architects-bristol-arena-site-uk-news-architecture/>

<https://www.bristol247.com/news-and-features/news/plans-for-student-accommodation-on-temple-island-unveiled/>

"St. Philips footbridge in Bristol. A new river crossing for urban regeneration" Paper for IABSE New York 2019, authors Héctor Beade-Pereda (senior architect at Knight Architects), John McElhinney (Associate Bridge engineer at Jacobs), Bogdan Barbulescu (Principal bridge engineer at Jacobs)

Foto's

<https://www.archdaily.com/919803/st-philips-footbridge-knight-architects>

St. Philips voetgangersbrug, Bristol (VK) 2019	
Opdrachtgever	Gemeente Bristol
Architectonisch ontwerp	Knight Architects, Buckinghamshire (VK)
Constructief ontwerp	Jacobs, Londen
Staalconstructie	SH Structures, Sherburn-In-Elmet, North Yorkshire



Brugdek en balustrade

TERUGBLIK EXCURSIE ERASMUSBRUG

Op 3 oktober 2019 vond de allereerste excursie van de Bruggenstichting Young plaats: een spannende middag voor het kersverse bestuur. Blij waren we dan ook dat het enthousiasme voor deze excursie vanuit allerlei richtingen kwam: van jonge studenten tot de lang werkenden en alles er tussenin. Allereerst verzamelden we ons in 'de Rotterdam' van Rem Koolhaas waar we een fantastisch uitzicht op de Nieuwe Maas met al zijn bruggen hadden. Het beste uitzicht hadden we echter op het onderwerp van de dag: de Erasmusbrug. Misschien is dit wel de meest iconische brug van heel Nederland. Behalve een architectonisch hoogstandje zit het ontwerp ook technisch bijzonder in elkaar. Na een kort inleidend praatje van het bestuur trapte Jaco Reusink van Ingenieursbureau Rotterdam de dag af. Hij vertelde ons allereerst over de werkzaamheden van Ingenieursbureau Rotterdam in het algemeen. Onder andere hun inzet voor de CUR-aanbeveling 124: "Constructieve veiligheid bestaande bruggen en viaducten van decentrale overheden" kwam naar voren. Daarna spitste de presentatie zich toe op het ontwerpproces van de grootste en zwaarste basculebrug in West-Europa: de Erasmusbrug. Het ontwerpproces ging gepaard

met complexe uitdagingen die voortkwamen uit de wensen van de architect (Ben van Berkel) en de randvoorwaarden waaraan het ontwerp moest voldoen. Een voorbeeld hiervan is de knik die in de pyloon verwerkt zit: technisch ingewikkeld, maar architectonisch gezien natuurlijk prachtig.

Na de presentatie begaf de groep zich, inmiddels in tweeën gesplitst, zich het druilerige weer in om alles eens in het echt te bekijken. Eén groep startte de rondleiding in de basculekelder, terwijl de andere groep het bedienhuis ging bekijken.

De grootste en zwaarste basculekelder van West-Europa is natuurlijk indrukwekkend om te zien. Nog indrukwekkender is het wanneer

deze bascule in beweging komt tijdens een rondleiding. Dat geluk (of timing) hadden wij als groep! Staand op de balkons met roostervloer tegen de wand van de basculekelder konden we van wel heel dichtbij aanschouwen hoe het bewegingswerk in actie kwam. Natuurlijk kan ook de (netwerk)borrel niet ontbreken. Om de middag af te sluiten werd, wederom met prachtig uitzicht op de Erasmusbrug, het glas geheven op een geslaagde eerste excursie.

In het bijzonder willen we Jaco Reusink, René Plug en Patrick Keehnen van Ingenieursbureau Rotterdam bedanken voor het verzorgen van deze interessante middag. Hopelijk tot de volgende excursie!



BRIDGE TECHNIEK

DE BRUG TUSSEN WERKGEVERS
EN WERKNEMERS



Wij leveren vakmensen met kennis van bruggen & sluizen

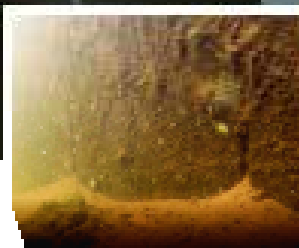
Plaza 24D | 4782 SK Moerdijk | (078) 629 55 36 | info@bridgebv.com | www.bridgebv.com

**Specialist In Asset Management
voor Civiele Kunstwerken**



Dronaboottinspecties

- Toekomstig breken en oever water
- Via programmeerbare routes inspectie in degradatie-inspectie van materialen
- Door slimme technologieën (AI) inspectie in combinatie met advies van (toekomstige) onderhoudsbeurten
- Onderzoek naar toekomstige problemen



4 meter onder water inspectie

WESTENBERG

Neem voor meer informatie contact op met Emile Hoogtarp
via 0341-467046 of e.hoogtarp@westenberg.net

**De Kunst van
keuze delen**

STREMMING HEFBRUG BOSKOOP

MARCEL VAN DEN ENG

De hefbrug Boskoop is sinds donderdagavond 10 oktober 2019 afgesloten voor zowel het verkeer over de weg als over het water van de Gouwe. Bij onderzoek bleek de brug constructief onveilig, waarop de onderhoudsaannemer direct begonnen is met werkzaamheden die nodig zijn om de constructieve veiligheid weer te kunnen garanderen. De stremming betekent dat er geen doorgaande verbinding mogelijk is over de Gouwe en dat de scheepvaart gebruik moet maken van een omleidingsroute.

De werkzaamheden omvatten een versteviging van de constructie van de heftorens door het aanbrengen van een extra windverband, waardoor de stabiliteit bij harde wind gegarandeerd is. Ook zijn enkele vakwerkknooppunten, die aangetast zijn door roest, hersteld.

Verder is de constructie versterkt die nodig is om de ballastblokken bij groot onderhoud aan op te hangen. Deze constructie is nodig om

het brugdek veilig uit te kunnen varen. Door deze versteviging nu aan te brengen, wordt de stremmingstijd bij toekomstig onderhoud teruggebracht.

Daarnaast is van de gelegenheid gebruik gemaakt om de schade aan de slijtlaag op het brugdek die tijdens de reguliere inspectie aan het licht is gekomen, nog voor de vorstperiode te herstellen. Vorst kan deze schade immers verergeren.

De provincie Zuid-Holland heeft vanzelfsprekend twee soortgelijke bruggen over de Gouwe in Waddinxveen en in Alphen aan den Rijn (Gouwesluis) onderzocht. Er zijn geen aanwijzingen dat deze bruggen op dit moment niet veilig zouden zijn.

Eind november is de stremming weer opgeheven.



Raad van Advies Bruggenstichting

ARUP



ProRail



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

NEDERLANDSE BRUGGENSTICHTING

BRUGGEN



WWW.BRUGGENSTICHTING.NL