

5 Mm

De Prins Clausbrug is een nieuwe fiets-voetgangersbrug die de nieuwe woonwijk Stadswerven verbindt met de historische binnenstad van Dordrecht.

De basculebrug, ook schakel vanaf de N3 (richting Papendrecht) naar het stadscentrum, heeft een rechtopstaande scharnierende ballastmast die met een pendelstaaf overeind wordt gehouden. Een bijzonder mechanisme met bovendien een allesomvattende 5 mm tolerantie-eis over het geheel.

ir. R. van Zuuk

René van Zuuk is directeur/eigenaar van René van Zuuk Architecten in Almere.



De opdracht kwam van de gemeente Dordrecht die in december 2014 met Architectuur Lokaal een prijsvraag organiseerde in een *Open Oproep voor architecten*. De bouw is gesubsidieerd door Provincie Zuid-Holland. In totaal kwamen er 127 (inter)nationale inzendingen binnen. Vijf werden geselecteerd en mochten verder worden uitgewerkt. Het ontwerp van René van Zuuk Architecten, ABT en Ingenieursbureau Boorsma won als 'een zeer innovatief voorstel met een krachtige sculpturale landmark, waarmee Dordrecht onmiskenbaar op de kaart wordt gezet'. Los van de technische oplossingen week het ontwerp ook af in stedenbouwkundige zin. De brug ligt niet loodrecht over het Wantij, maar schuin. Dit had als voordeel dat het fietspad vanuit Stadswerven vloeiend doorloopt naar het Noorderhoofd, een uitstulping in de rivier aan de oude binnenstadzijde. Een loodrechte uitvoering leidt tot een kortere overspanning, maar de brug zou uitkomen naast de hoofdroute, op een steeg ten oosten van het Noorderhoofd.

Eisen

Vanuit de uitvraag was een minimale footprint in het water en een onbeperkte doorvaarthoogte vereist. Daarnaast moest de brug gebalanceerd zijn en was het niet toegestaan om een klap- of draaibrug te maken. Daarmee werden de bestaande technische mogelijkheden sterk beperkt. Voor een ophaalbrug was de overspanning van 50 m te groot, een hefbrug heeft geen onbeperkte doorvaarthoogte en een staartbrug is beperkt balanceerbaar. Daarnaast heeft een basculebrug meestal een basculekelder dat zou leiden tot een te grote footprint in het water. Wat overbleef was een basculebrug zonder kelder. Een spannend uitgangspunt omdat de brug slechts 5 m boven het water zou komen te liggen. Bij een basculebrug zit het contragewicht direct aan de liggers die ook het wegdek dragen. Het wegdek zit voor het draaipunt en het contragewicht erachter, samen in evenwicht. (kromme zin) Door de schuinplaatsing heeft de Prins Claus-brug een overspanning van bijna 50 m. Normaal steekt de ligger voor het contragewicht van een basculebrug 25% van de wegdek lengte (val) aan de andere kant van het scharnier



Draaibare ballastmast.

uit en dat zou hier 12,5 m moeten zijn. Maar met een brughoogte van 5 m zou bij opening het contragewicht 7,5 m in het water plonsen, hetgeen niet acceptabel is. De arm moest daarom beperkt worden tot enkele meters wat leidt tot een veel zwaarder contragewicht. Een gewicht zo groot, dat het fysiek niet mogelijk was om die op de beperkte lengte te plaatsen.

Constructie

Er is daarom gekozen voor een uniek constructieprincipe: een basculebrug met een rechtopstaande scharnierende ballastmast die met een pendelstaaf overeind wordt gehouden. Het voordeel is dat met het verlengen van de mast er een onbeperkte hoeveelheid ballast in deze constructie geplaatst kan worden.

Door deze draaibare ballastmast wordt het openen en sluiten van de brug een 'schouwspel'. Een beweging waarbij de mast eerst vooroverbuigt en weer terugkomt. Dat betekent dat de ballastmast bij opening naar het val toe beweegt en dan met het bewegende val tot stilstand komt op 85°. Bij sluiting blijft de ballastmast de eerste 45° van de beweging bij het val, waarna de mast zich 'majestueus' opricht.

Uitstraling en ambitie

De brug is in totaal 141 m lang en bestaat uit twee stalen aanbruggen en een val van bijna 50 m lang vanaf de draaiaas gemeten. De draagconstructie bevindt zich in het midden van het dek waardoor het mogelijk is om bij deze forse overspanningen toch een slank ogende brug te realiseren. Doordat de



De draagconstructie bevindt zich in het midden van het dek...



...waardoor het mogelijk is om bij deze overspanningen een slanke brug te maken.



De constructie zelf wordt verlicht vanaf de zijkant.



Rechtopstaande scharnierende ballastmast die met een pendelstaaf overeind wordt gehouden.

hoofdliggers deels boven het brugdek wordt gehouden, ontstaat er een scheiding tussen voetgangers-fietsersgedeelte die met een hoogte van 45 cm boven het wegdek ook als bank gebruikt kan worden. De twee hoofdliggers van het val verjongen in hoogterichting bovendeks vanaf het draaipunt in een geleidelijke beweging en gaan als organisch over in de middenberm op de westelijke aanbrug. De hoofdliggers zijn bij het val gescheiden om ruimte te bieden aan de ballastmast. Ter plaatse van de scheiding worden de hoofdliggers gekoppeld door vakwerkstaven. Hier is zicht op het water. Aan de voorzijde komen de gescheiden hoofdliggers weer samen. De ambitie is hoog. De stalen aanbruggen zijn vloeiend en slank. Aanbrug oost krult met twee brugdelen rondom de kelderpijler samen tot één dek aan het uiteinde. De fietsers en voetgangers worden aan weerszijden om de ballastmast en pendelstaaf heen geleid en hebben daarbij zicht op het brugmechanisme. Omdat de fundering geen

ballastkist hoeft te bergen, kon deze als een uitwaaiende sokkel worden uitgevoerd, slank opkomend vanuit het diep. De zes draaipunten zijn volledig weggewerkt onder kappen die ogenschijnlijk samenvloeien met de aansluitende constructiedelen. De technische ruimte en de bedieningsruimte zijn tussen de hoofdliggers geplaatst en worden volledig zichtbaar als de brug opent. Beide aandrijfcilinders van de brug mogen gezien worden en staan daarom buiten de kelder. Vanaf de oostelijke zijde is de opstelling en werking van de cilinders duidelijk afleesbaar. De straatverlichting in de leuning verlicht het wegdek. De constructie zelf wordt verlicht vanaf de zijkant zodat de brug op afstand goed zichtbaar is maar in de stad minder opvalt. De antracietkleur sluit aan bij andere bruggen in de stad. Het contragewicht, de pendel en liggers wijken af in lichtgrijs. De voornaamste ambitie echter is de 5 mm tolerantie-eis over de gehele stalen brug in rustende toestand bij 20° C om het geheel, als een

autochassis, ook als 'vloeiend' geheel te kunnen zien, zonder hinderlijke overgangen of naden.

Ontwerpproces

Na het winnen van de prijsvraag is het ontwerp uitgewerkt tot er een bindend architectonisch DO gemaakt kon worden. Dit hield in dat er een accuraat 3D-model gemaakt is waarvan de aannemer slechts de bewuste 5 mm af mocht wijken. Het 3D-model is daarmee bindend. De 5 mm geeft enige speling ten aanzien van plaatdiktes, overgangen en vlakheid maar is klein genoeg voor een 'strakke' brug. Vervolgens is het ontwerp aanbesteed. In 2018 gunde gemeente Dordrecht het constructief ontwerp en de uitvoering aan bouwcombinatie Dura Vermeer en Hillebrand. Iv-Infra werkte in hun opdracht het referentieontwerp uit tot een integraal Definitief Ontwerp en Uitvoeringsgereed Ontwerp. Van de prijsvraagcombinatie heeft uiteindelijk alleen de architect het gehele proces meegelopen en -gemaakt. •



Vloeiend geheel...



...zonder hinderlijke overgangen of naden.



De antracietkleur sluit aan bij andere bruggen in de stad.



Beide aandrijfcilinders mogen gezien worden en staan daarom buiten de kelder.

Een baan rondom de ballastmast

Het bewegingsconcept en ambitieuze vormgeving van de Prins Clausbrug vormden het belangrijkste uitgangspunt in de uitwerking van het architectonisch ontwerp. Vooral het beheersen van de verticale en horizontale vervormingen bij de voegovergangen, in interactie met de vervormingen van de aanbruggen, is een belangrijke opgave. Dat heeft tot inventieve oplossingen geleid.

ir. B. van Korten

Britte van Korten is ontwerpmanager bij Iv-Infra in Haarlem. Dit artikel bevat (licht bewerkte) delen uit 'Constructief ontwerp Prins Clausbrug Dordrecht', Bruggen 4 (jaargang 27), december 2019.

Bewegingsmechanisme

Het val, de ballastmast en de pendelstaaf bewegen als één mechanisme op de betonnen draaipuntspijler (de sokkel). 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 scharnierend met de bovenzijde van de oostelijke aanbrug verbonden. Tijdens de valbeweging maakt het draaipunt van de ballastmast een cirkelvormige baan om de draaipunten van het val. Aangezien de ballastmast (van scharnierpunt tot scharnierpunt) en de pendelstaaf een vaste lengte hebben, zijn de posities en de zwaartepunten van beide 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.

Sluitende momenten

Omdat de pendel de ballastmast overeind houdt, oefent de pendelstaaf naast een verticale component ook een horizontale belasting uit (in langsrichting) op het onderdraaipunt. Deze varieert met de openingshoek van de brug. Deze horizontale kracht wordt zo via de hoofdliggers van aanbrug oost via doken teruggeleid naar de betonnen sokkel.

Bij het openen van de brug neemt tot $\pm 45^\circ$ opening het sluitende moment om de draaiaas vrijwel niet af, maar juist iets toe. Vanaf 45° gaat het sluitend moment in een vloeiende beweging vervolgens weer omlaag. Dit verloop is karakteristiek voor het mechanisme en in belangrijke mate bepalende voor de krachten op de aandrijfcilinders. Ook voor het bepalen van windbelastingen is de beweging van ballastmast complicerend. Deze invloeden zijn daarom in een ANSYS Workbench-model bepaald en verwerkt in de berekeningen van de hydraulische aandrijving.

Pendelstaaf en ballastmast

De pendel en ballastmast zijn uitgevoerd als dikwandige, kokervormige constructies. De ballastmast is aan de onderzijde voorzien van een kist die wordt gevuld met stalen knuppels (half-fabrikaten uit een continu gietmachine van een staalfabriek) en stalen regelballast: zogenaamde 'ballastbroodjes' van 20-25 kg/stuk, waarmee het evenwicht van de brug fijn-geregeld kan worden.

Aan de binnenzijde van de wanden van de ballastmast worden dikke staalplaten gelast. Deze maatregelen leiden tot het gewenste evenwicht van de brug om de draaiaas, zodat de krachten en het vermogen die de bruggaandrijving moet opbrengen om de brug

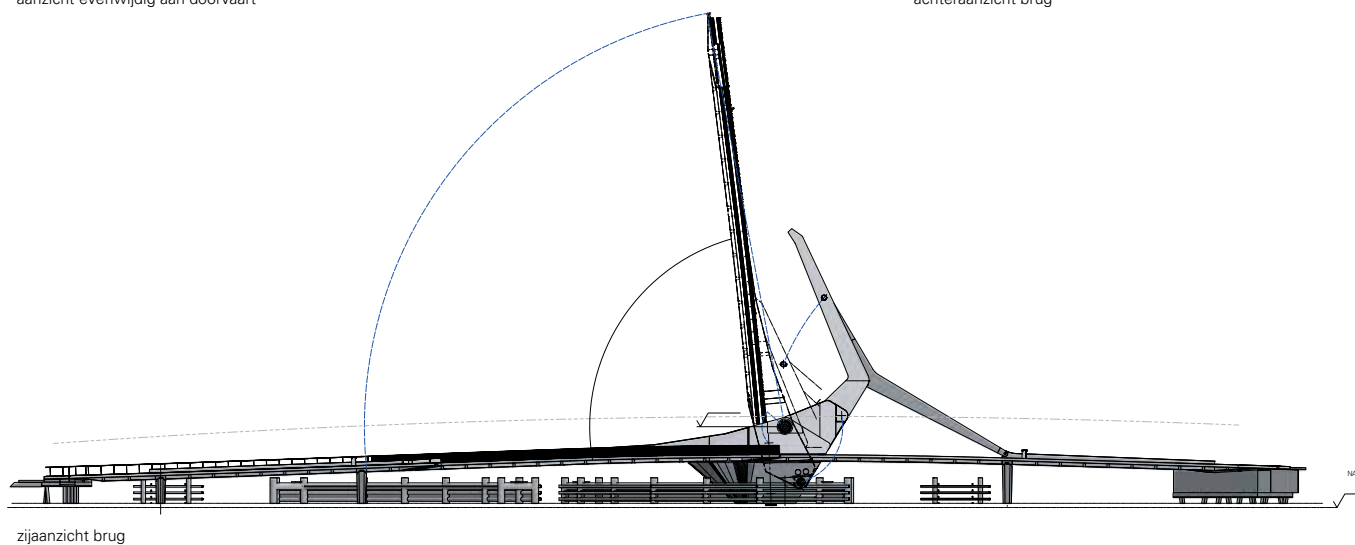
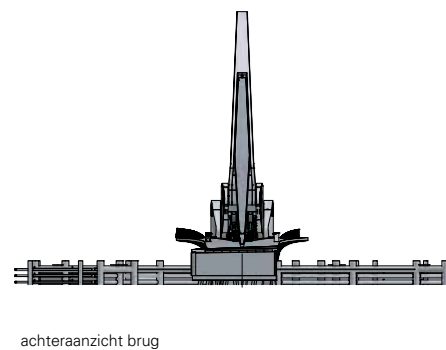
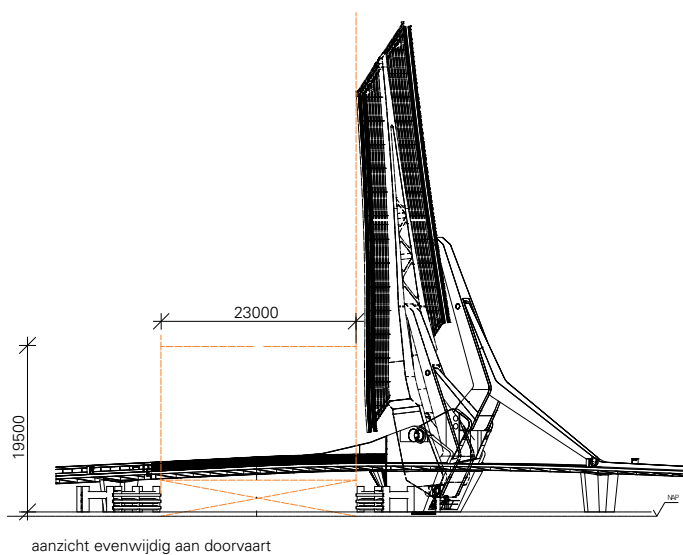
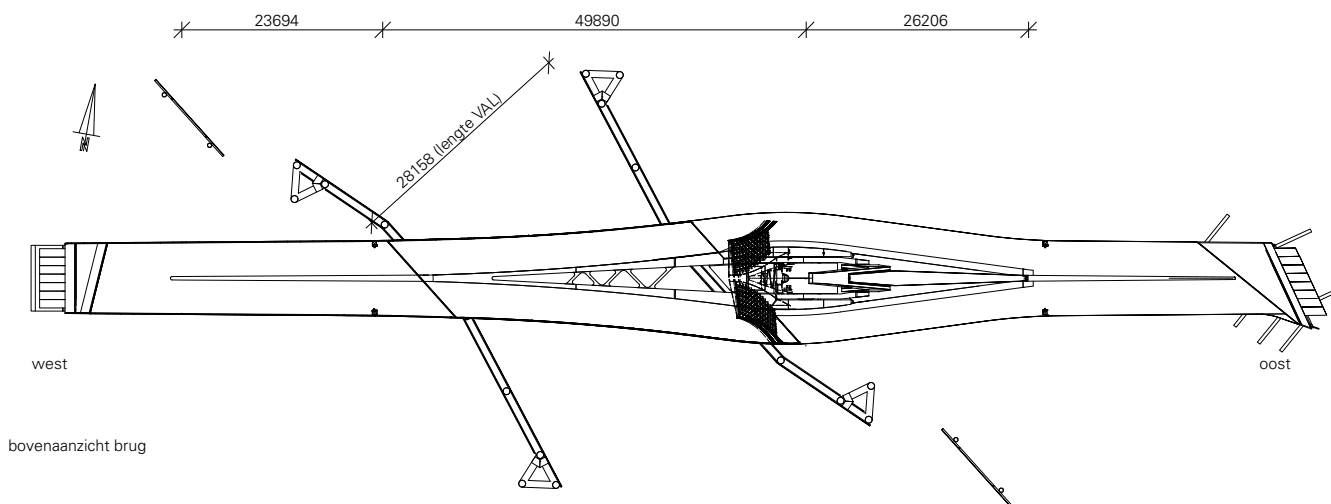
te bewegen, tot een minimum kan worden beperkt.

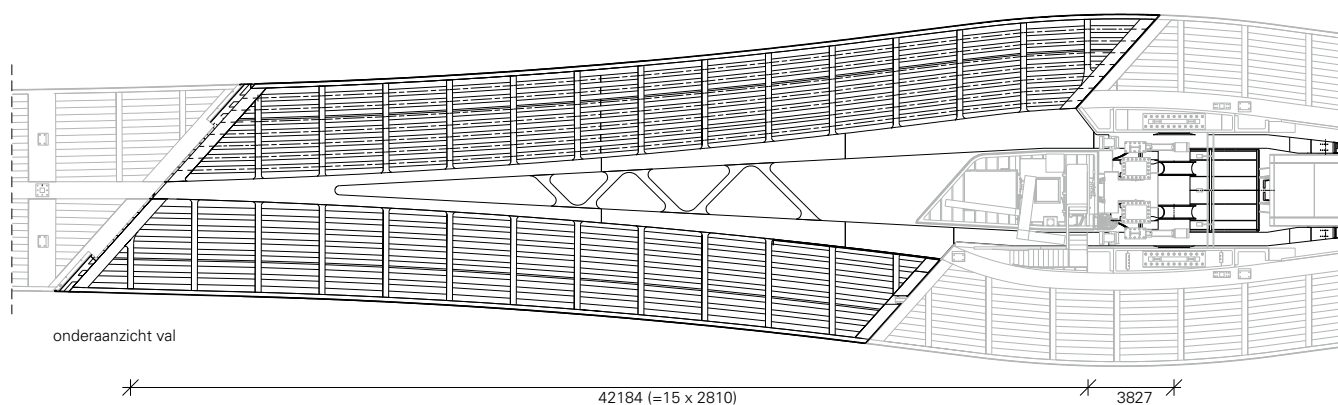
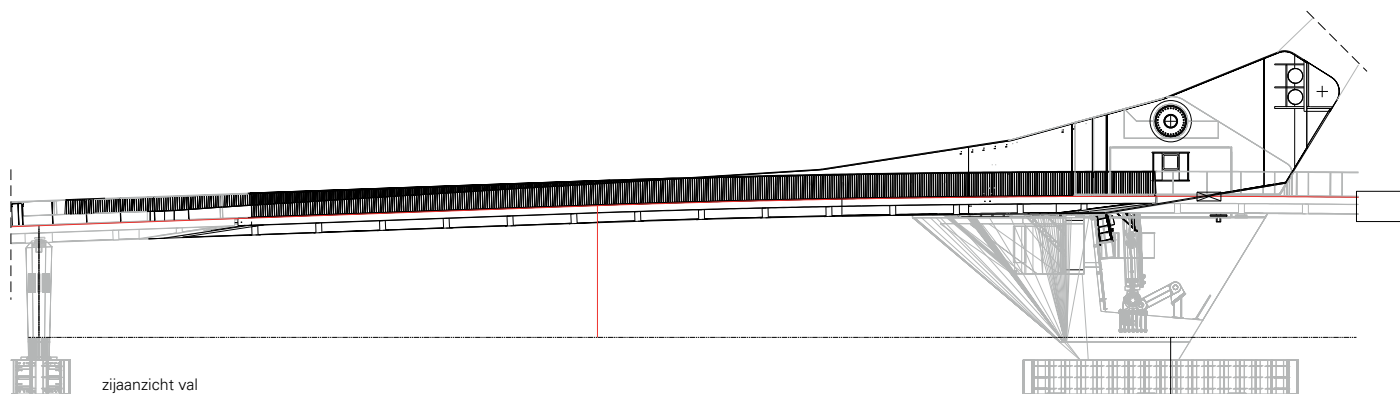
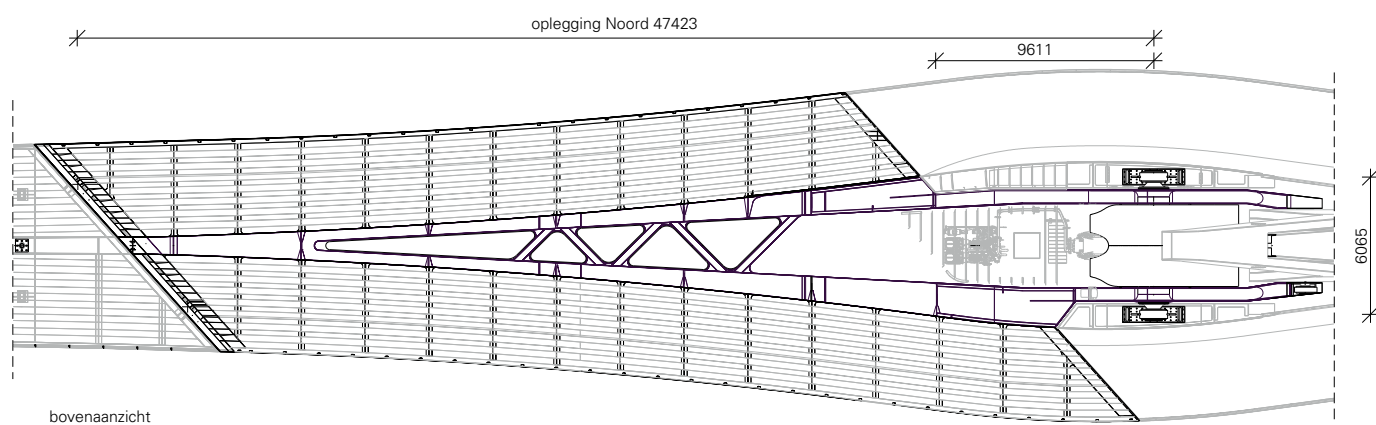
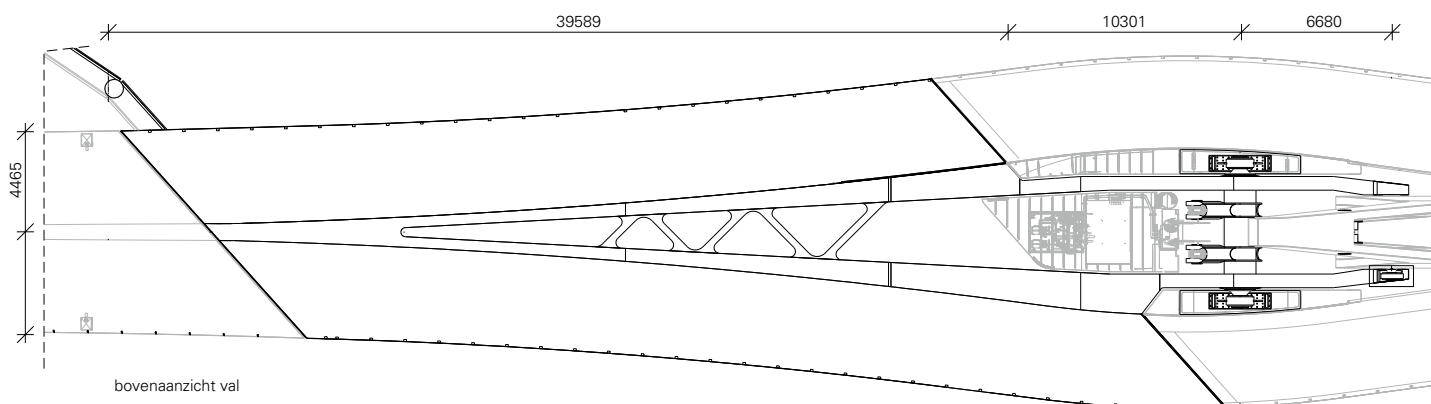
Val

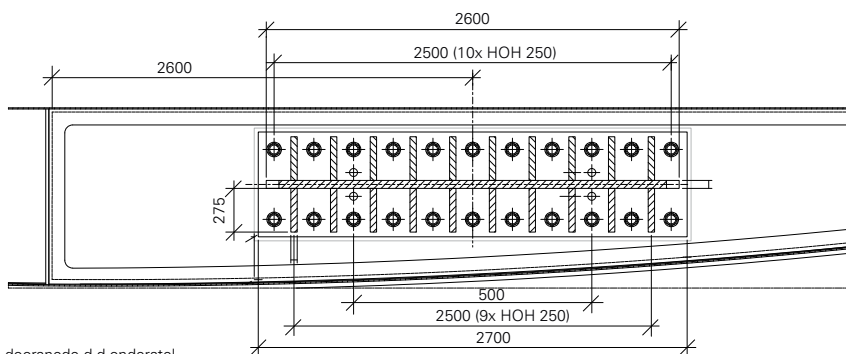
Het val bestaat uit twee orthotrope rijdekken van ± 4 m breed die aan weerszijden uitkragen vanuit een centrale, torsiestijve hoofdligger. Deze kern wordt gevormd door twee kokers, die via een vakwerk onderling zijn gekoppeld. De vaste ligging van de brug op de vooropleggingen wordt volledig door de onbalans gegarandeerd, onder alle omstandigheden. Daarom hoeft de brug niet apart te worden vergrendeld in gesloten stand. Voor de staalconstructie van het val zijn vermoeiing van de hoofd draagconstructie, door het openen en sluiten van de brug en de onder- en overdruk in de luchtdicht afgesloten hoofdliggers, van belang geweest voor het ontwerp. Daarbij vormde het beheersen van de verticale en horizontale vervormingen bij de voegovergangen, in interactie met de vervormingen van de aanbruggen, een belangrijke opgave die tot inventieve oplossingen heeft geleid.

Bouwzeeg

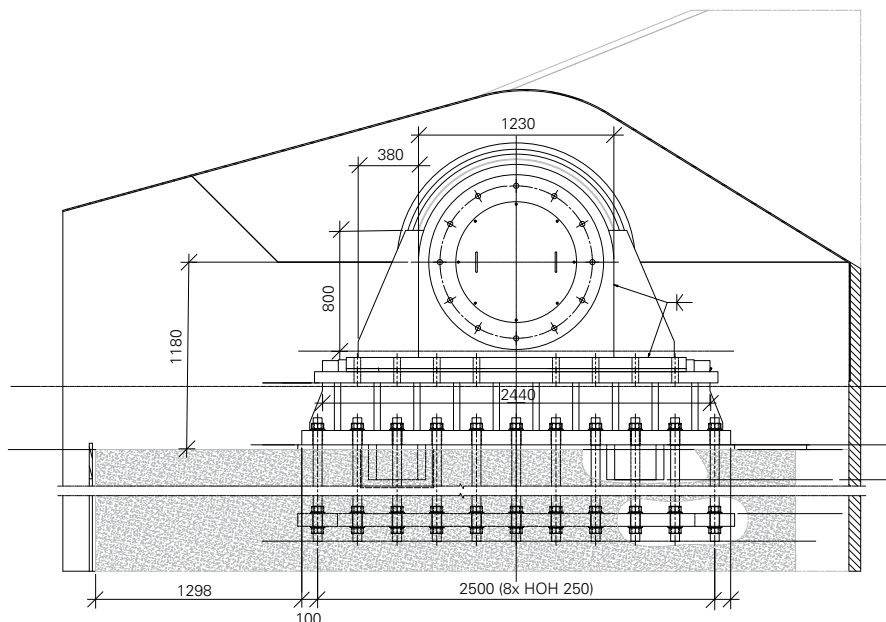
De twee vooropleggingen onder de voorhar van het val rusten op de einddwarsdrager van aanbrug west, die bij de oplegblokken 2,5 m (noordzijde) respectievelijk 7,3 m (zuidzijde) uitkragen voorbij de pijler. Hierdoor wordt de voorhar van het val dus flexibeler ondersteund dan gebruikelijk. Bovendien hebben 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, worden de opleggingen via een bouwzeeg verschillend voorgespannen.



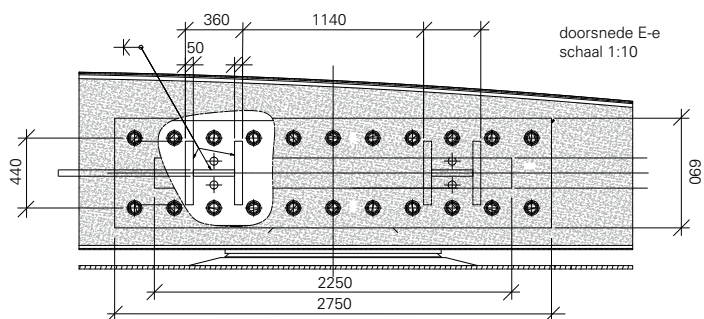




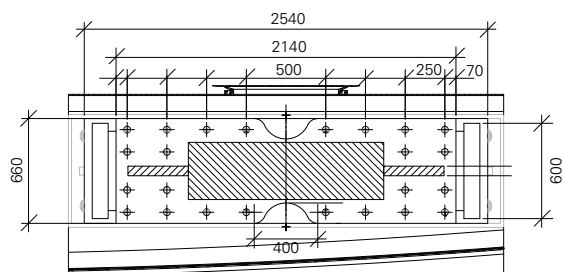
doorsnede d-d onderstel
schaal 1:10



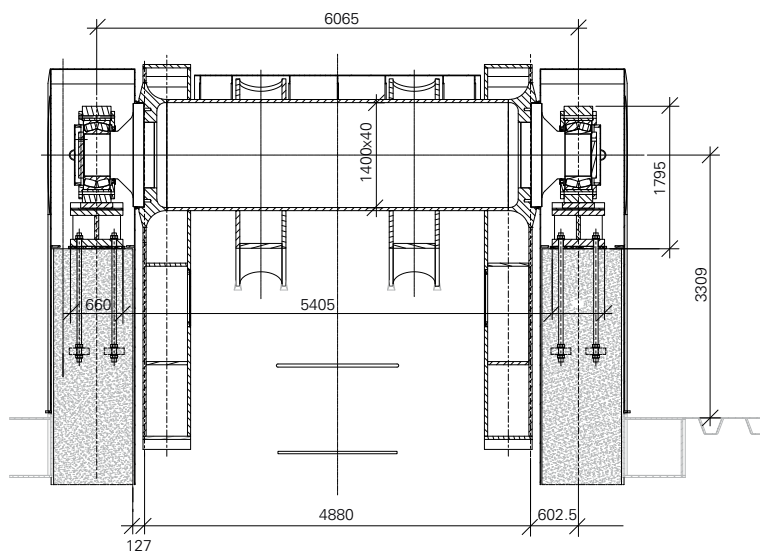
doorsnede b-b
schaal 1:10



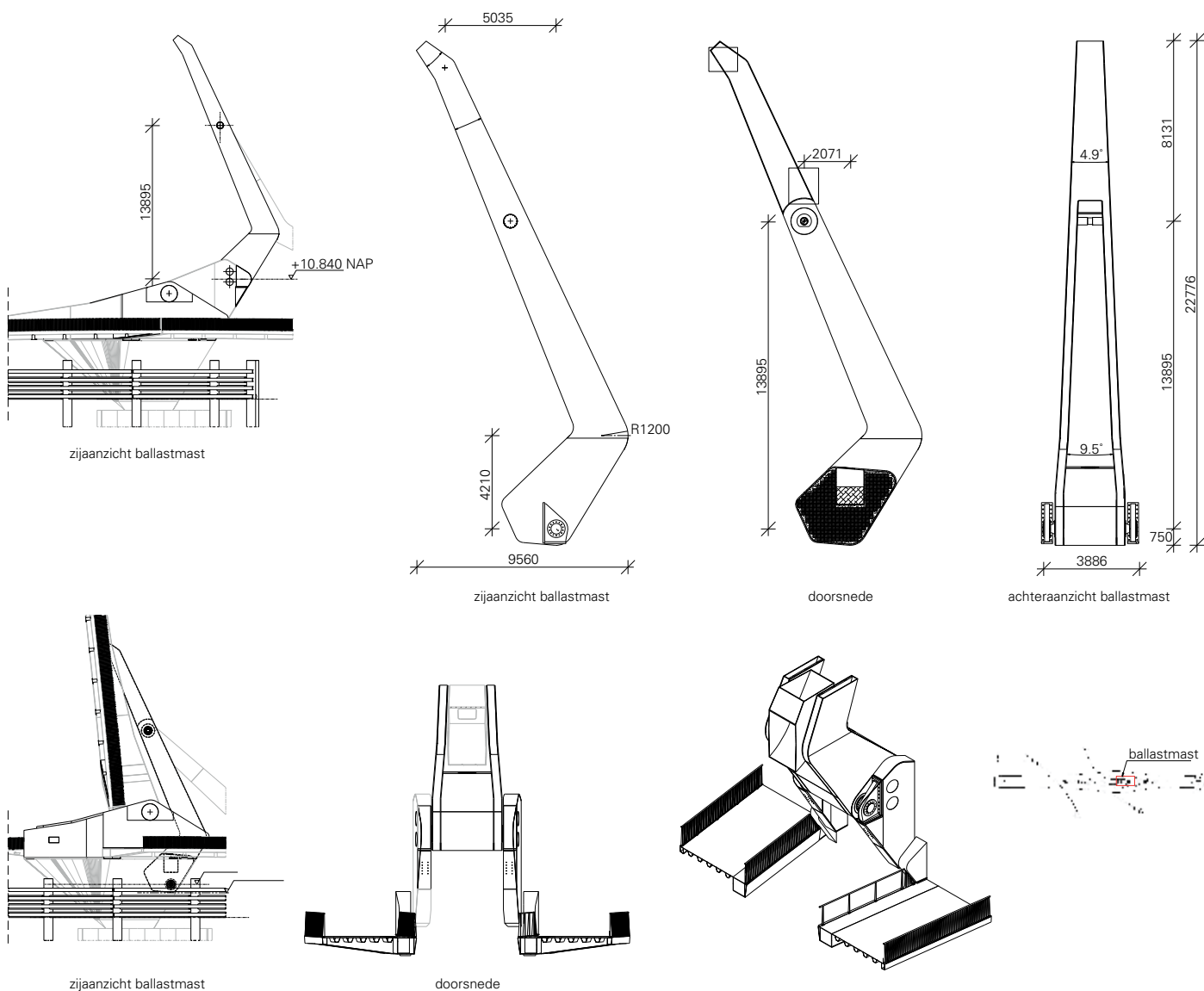
doorsnede E-e
schaal 1:10



doorsnede c-c, bovensteel
schaal 1:10



doorsnede a-a
schaal 1:20



Voeglip

Ander aandachtspunt bij de voorhar vormde de horizontale voegvervormingen. Door de grote vallengte en de horizontale beweging van de westelijke aanbrug zouden de voegbreedtes op een koude dag hier groter worden dan veilig wordt geacht. Dit is opgelost door een onderliggende voeglip in de voegopening toe te passen. De voeglip bestaat uit een horizontale roestvast stalen plaat die ± 30 mm onder dekniveau aan de aanbrug is bevestigd. De plaat maakt de voeg ondiep, waarmee het gevaar 'door de voeg heen zakken' met een naaldhak is weggenomen. Onder het midden van de voorhar is een extra steunpunt met speling aangebracht om verticale vervormingsverschillen tot een minimum te beperken.

Extra steunpunt

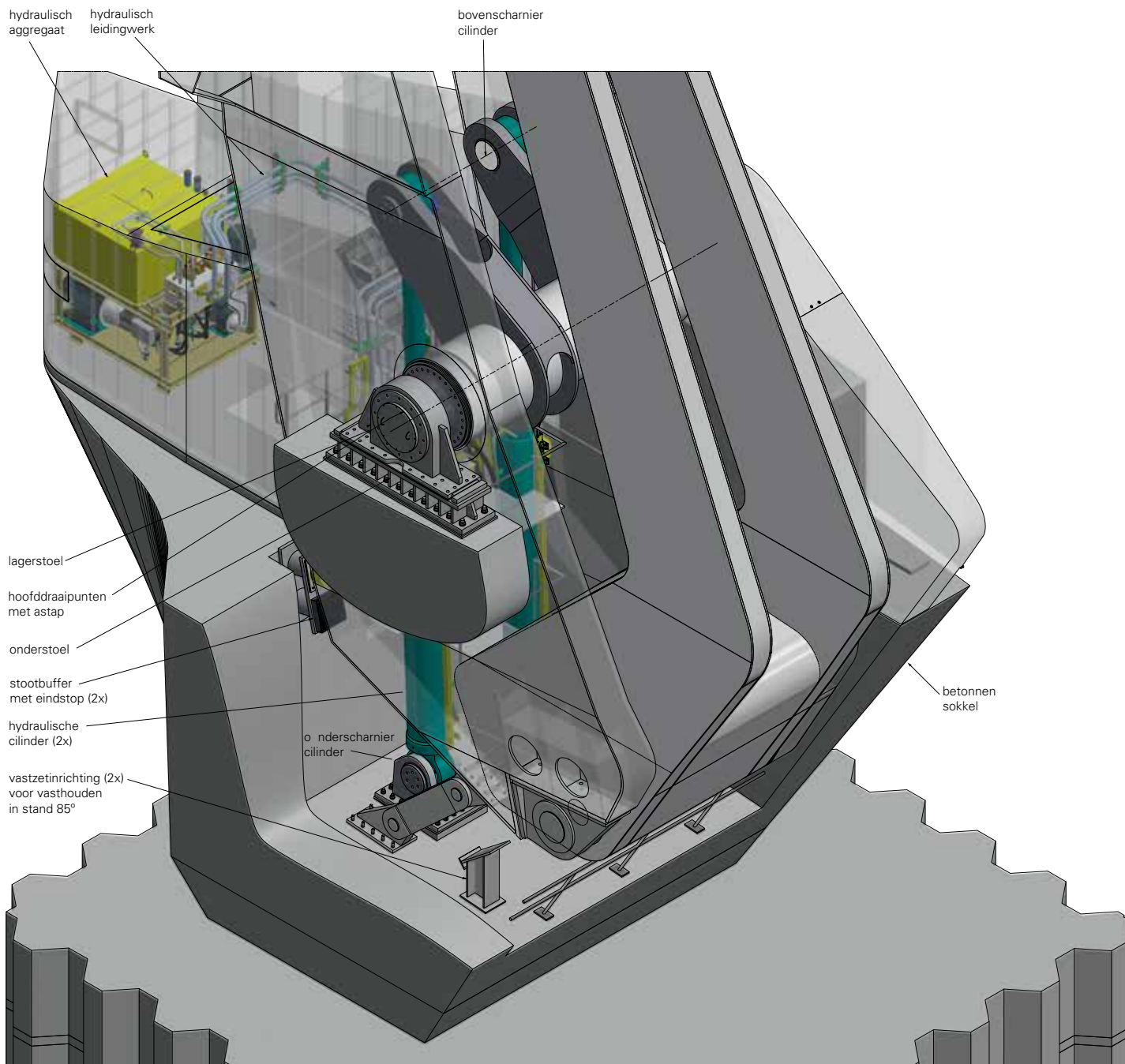
Ook bij de achterhar zijn onconventionele oplossingen toegepast om de vervormingen te controleren en een vaste ligging te borgen. De schuine voeg tussen val en aanbrug oost bevindt zich aan de noordelijke achterhar op

een gemiddelde afstand van zo'n 12 m vanaf het draaipunt. Deze grote afstand leidt – zonder maatregelen – tot ontoelaatbare hoogteverschillen aan weerszijden van de voeg, door doorbuiging van de hoofdligger bij ongelijkmatige opwarming van de brug of bij grote persoonsbelasting. Om de vervormingsverschillen te beperken, is er een extra steunpunt onder het dek van het val toegepast en is de dekplaat van het val over een zekere lengte los gehouden van de hoofdligger, om een flexibel uitkragend dekdeel te verkrijgen. Bij het sluiten van het val wordt dit dekdeel door het extra steunpunt aan de oostelijke aanbrug enigszins omhooggeduwd, waardoor het dek verticaal licht wordt opgespannen tegen het steunpunt. Door deze voorspanning kunnen alleen bij extreme vervormingen van het val (beperkte) hoogteverschillen ontstaan.

Hoofddraaipunten val

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: robuuste en zwaar belastbare wentellagers. Dergelijke wentellagers hebben als voordeel dat zij een zeer lage rolweerstand hebben (de wrijvingsfactor μ_f bedraagt $\pm 0,002$), 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.

Brugaandrijving

De brug beweegt door een hydraulische aandrijving uit twee hydraulische cilinders die worden uit- en ingestuurd door een elektro-hydraulisch pompaggregaat. De cilinders zijn voorzien van een bodemoog en stangoog, en scharnierend met het val en de kelderbodem verbonden door vezelversterkte kunststof bolscharnierlagers. Glijgeleidingen op zowel bodem- als stangoog beperken de rotatievrijheid van de cilinder en stangkop om de cilinderas om staal-op-staal schrapen te voorkomen. Het stangoog is met een

scharnierpen gekoppeld aan twee wangplaten, verbonden door 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 vastgezet met voorgespannen ankers.

Om de krachten in normaal bedrijf zo goed mogelijk te verdelen over beide cilinders, zijn deze zowel aan bodem- als stangzijde hydraulisch gekoppeld, waardoor ze als het ware als één cilinder bewegen. Dit maakt een gelijklooptregeling voor de aandrijving overbodig en zelfs ongewenst. Het in- en uitsturen van de cilinders is gebaseerd op een halfgesloten hydraulisch systeem zonder remventiel. De brugbeweging wordt voor zowel openen als sluiten van de brug via

een vloeiend verlopend snelheidsdiagram geregeld, waarbij de bewegingssnelheid van de cilinders wordt bepaald door de traploos regelbare opbrengst van de plunjerpomp, die deel uitmaakt van het hydraulisch aggregaat. Zo wordt de brugbeweging op een beheerste en stabiele wijze bestuurd.

Bij (incidenteel) hoogwater kunnen de keldervloer en de voet van beide cilinders onder water komen. Om het draaipunt aan de cilinderbodemzijde afdoende 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, waterresistente coating. •



Een 'zware oefening'

De bouw van de Prins Clausbrug is grofweg te verdelen in de onderbouw en bovenbouw. De onderbouw bestaat uit vier steunpunten in de watergang (het Dordtse Wantij) en twee landhoofden. De bovenbouw bestaat uit twee stalen aanbruggen en een val die in twee fabriekshallen in Middelburg en Vlissingen zijn gebouwd en vervolgens getransporteerd en gemonteerd op de bouwlocatie.

ing. N. Ramkema en ing. M. Kuzee

Niels Ramkema is tendermanager/projectmanager bij Dura Vermeer Infra Regionale Projecten in Hoofddorp. Martijn Kuzee is projectleider bij Hillebrand/ASK Romein in Vlissingen.

De gemeente Dordrecht wilde de vaarweg tijdens de werkzaamheden beschikbaar houden. Een ander vereiste: véilige werkzaamheden. Daarom zijn eerst de geleidewerken geplaatst. Deze 'hekwerken' schermen de vaarweg af, minimaliseren overlast voor de

scheepvaart en waarborgen de veiligheid van de bouwplaatsmedewerkers.

Onderbouw

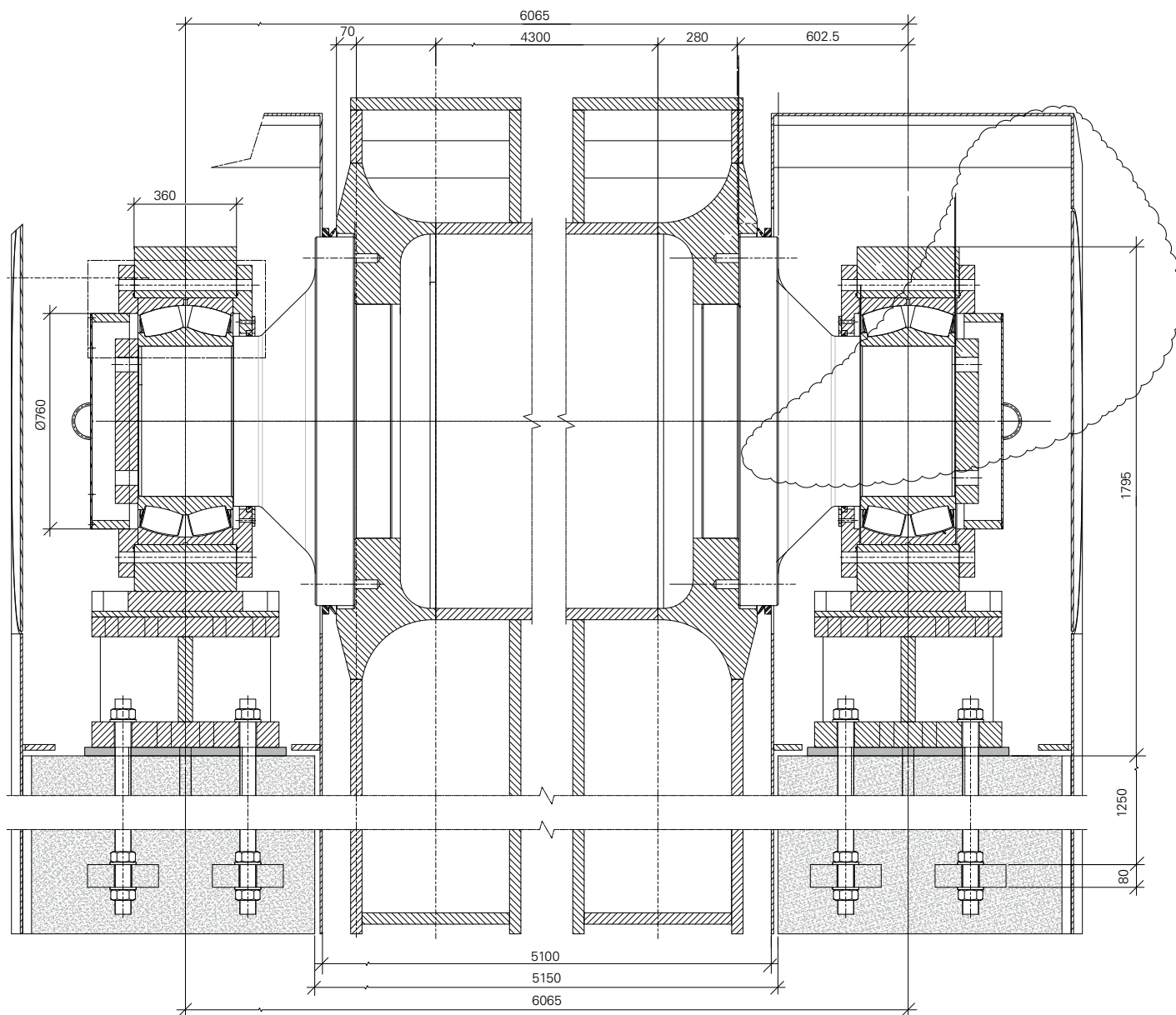
Nadat de geleidewerken waren geplaatst, kon worden gestart met de fundatie en de vier steunpunten. Drie van de vier zijn slank ontworpen. De pijlers boven water zijn geprefabriceerd. Het vierde steunpunt heeft de vorm van een scheepsromp. Dit steunpunt, de sokkel, draagt het val. De sokkel is compleet in situ gestort met de elektrotechnische installaties en hydraulische aandrijving erin weggewerkt.

De volgorde van bouwen van geleidewerk, steunpunten en bovenbouw heeft raakvlakken. Zo gaat de zinker (nodig voor de communicatie van en met de brug) tussen de geleidewerken door, wat afzinken bemoeilijkt. Ook moet de positie van de drijvende bok worden ingepast tussen de geleidewerken voor het monteren van de bovenbouw en conflicteren de hulpwerken voor de bekisting van de sokkel met de palen van de geleidewerken.

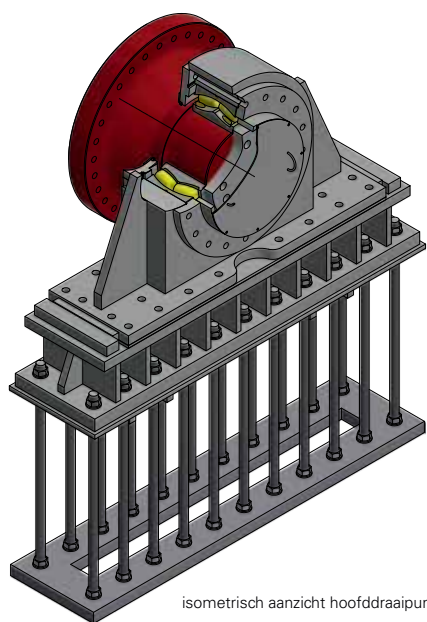
Fundaties

Voordat de steunpunten konden worden aangebracht, moesten de waterbouwkundige fundaties worden geplaatst. De paalfundering van de sokkel vormde hierbij een grote opgave. De sokkel draagt het complete val en hierop komen dus veruit de grootste krachten. Om deze te kunnen opnemen moest worden gefundeerd op de tweede harde zandlaag op -40 m^{NAP}.

Er is gekozen voor open stalen buispalen. Over het bovenste deel zijn de palen voorzien van wapening en volgestort met beton. Complicerende factor was de ongunstige verhouding tussen diameter (800 mm), wanddikte (16 mm) en paallengte (40 m). Door water en een slechte bodem in de eerste twintig meter, was de slagenergie slecht in de paal te brengen. Door een combinatie van trillend voorpoten van de palen en vrijhangend naheien is het uiteindelijk gelukt. Een andere 'zware oefening' waren de fundatiepoeren voor de drie prefab pijlers. Om de doorstroming zo min mogelijk te beperken,



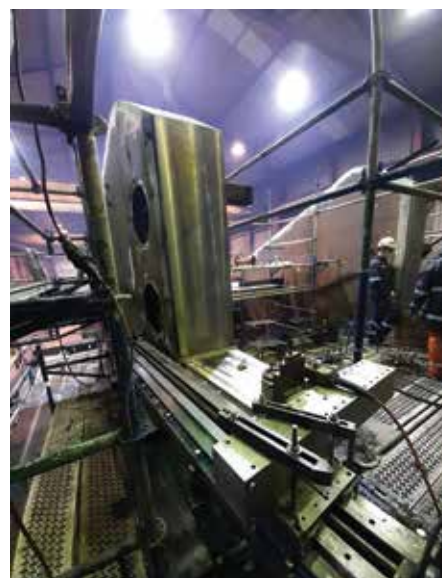
doorsnede a-a



isometrisch aanzicht hoofddraaipunt



Met precisiemateriaal (beitels, frees etc.) op de juiste maat gebracht.



In het val zijn zijn haakse hoeken gefreesd.



De kist.

was het noodzakelijk de fundatiepoeren zo klein mogelijk te houden. Daarom is ervoor gekozen deze te bouwen in een bouwkuip van damwanden met vier open stalen buispalen in de hoeken. Hiervoor werd het verticale draagvermogen van de palen en de damwand gebruikt en werd de damwand als permanente bekisting voor het onderwaterbeton en de fundatiepoer gebruikt. Om de bouwkuipen goed waterdicht te krijgen, is ervoor gekozen vooraf de fabriekssloten af te lassen en tijdens het intrillen van de damwanden slotvulling in de heislotten toe te passen.

Steunpunten

De drie pijlers zijn traditioneel geprefabriceerd op de kade van Verolme langs de Oude Maas. Met kraanschip de 'Missing Link' van Hapo zijn ze naar de projectlocatie gevaren en op de plek gehesen.

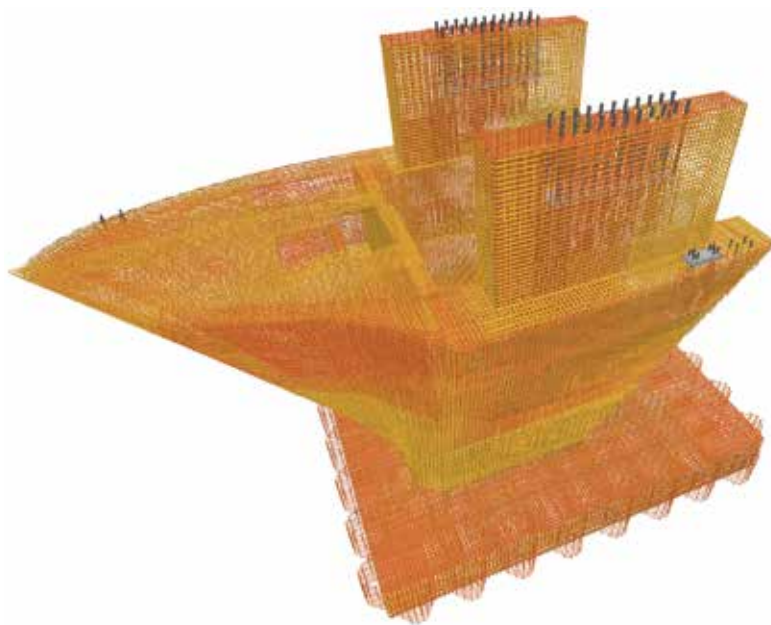
De zwaarste pijler weegt zo'n 70 ton. In de eindsituatie zijn de pijlers via een dookconstructie verbonden met de bovenbouw. Maatvoering was ook hier essentieel. De verbindingen moesten met een tolerantie van minder dan twee millimeter worden aangebracht. Een hele gebeurtenis met zo'n gewicht, hangend in een drijvende bok. Door een geleideframe kon dit gecontroleerd worden uitgevoerd.

Sokkel

Het vierde steunpunt, de sokkel, is verreweg het meest complexe betondeel. De vormgeving bovenwater lag vast in het architectonisch model. Voor het deel onderwater is gekozen om te werken in een bouwkuip met open stalen buispalen. Voor de constructieve stabiliteit en om droog te kunnen werken, is 2,5 m onderwaterbeton in de bouwkuip aangebracht. Gevolgd door de fundatiepoer, waarin de constructieve koppeling met de buispalen is gemaakt. Deze fundatiepoer vormde de basis voor de sokkel.

Voor het ontwerp van de bekisting was stortfasering belangrijk. Deze fasering werd bepaald door de niveaus van de gebruiksruimtes en onder andere het hoofddraaipunt. Vanwege de vele raakvlakken met installaties, geleidewerken en het constructieve ontwerp, is in de tenderfase al een basisontwerp voor deze complexe bekisting gemaakt. Dit ontwerp is nader uitgewerkt in 3D door Dura Vermeer en MZ bekistingen.

Naast de vorm van de sokkel, was ook de omvang van de bekisting een flinke klus. Uiteindelijk had de complete 'doos' een omvang van zo'n 16x10x6 m. Om deze kolos te maken, is hij in fases geprefabriceerd en in de fabriekshal samengesteld. Zo was gegarandeerd dat alle delen in het werk pasten.



De sokkel.

Toen de bekisting klaar was, is het gedemonteerd, in delen naar het werk getransporteerd en weer opgebouwd. Ter plaatse zijn de laatste constructieve koppelingen aangebracht. Door 'zoekers' of paskoppelingen toe te passen, pasten de bekistingsdelen als puzzelstukjes in elkaar. De 3D-puzzel werd laag voor laag in de bouwkuip gepositioneerd, waarbij net genoeg ruimte was voor de bekisting en werkzaamheden. Na montage werden de laatste oneffenheden en kleine beschadigingen hersteld. Na het storten van het beton moest de bekisting worden gesloopt. Ruimte om te demonteren was er niet.

Wapening sokkel

Ook de wapening van de sokkel was een huzarenstukje. Elke doorsnede van de sokkel is uniek en daarmee elke wapeningsstaaf ook. Al vroeg in het ontwerptraject is ervoor gekozen om alle wapeningstekeningen in 3D te laten uitwerken door wapeningsspecialist Diepstraten. Voor uitvoerbaarheid was veel afstemming tussen de 3D-modellieur en de constructeur noodzakelijk.

Uiteindelijk is de wapening uitgetekend in stappenplannen. Hierin werd voor de vlechters per betonstortfase stap voor stap aangegeven hoe de wapening moest worden opgebouwd. Ook hier was intensieve samen-



Behandeld in een bad met vloeibaar stikstof.

werking basis voor succesvolle uitvoering met minimale faalkosten. Nadat bekisting en wapening waren aangebracht kon alles 'grijs' gemaakt worden. Vanwege de massieve stort en de vaak lastige bereikbaarheid zijn er speciale betonmengsels gebruikt voor de juiste consistentie, waarbij warmteontwikkeling en scheurvorming werden beperkt.

Bovenbouw

Terwijl op locatie het betonwerk in volle gang was, werd in de productiefaciliteiten gewerkt aan het samenstellen en lassen van de volledige stalen bovenbouw. Ook hier was – uiteraard – maatvoering essentieel. Door het laswerk grotendeels onder de hand uit te voeren, was de complexe maatvoering goed beheersbaar. Letterlijk 'onder de hand' als tegenovergestelde van 'boven de hand' (in positie) als bij een plafond schilderen.

Onder de hand te lassen is makkelijker, de kwaliteit (vervorming) is beter te garanderen en het gaat sneller. Het proces van vervormen is beter beheersbaar. Robotiseren was hier niet mogelijk, vaak niet overigens, automatiseren daarentegen wel.

Deze projecten kunnen dus niet worden gero-botiseerd. Een robot heeft minder bewegings-vrijheden dan een mens. En hoe kostbaar is



Bij opwarmen zit het lagerstoel moervast.

eenmalig programmeren? Bij de lange lassen wordt een automatische kar ingezet (begeleid door een wiel) met de lasser als controleur (uit koers of verstopte lasdraad). Wat vaak ook gebeurt is dat twee karren tegelijk worden gebruikt. Alle troggen zijn automatische gelast. Samenwerking tussen de mensen van Hillebrand en Team Industrial Services was hierin van groot belang. Dat is altijd van belang maar hier specifiek meer, op het gebied van maatvoering. Door de interactie tussen beton en staal met de bijzonder vorm en opvallende lengtes. Er waren geen correctiemogelijkheden, achteraf. Binnenshuis lassen was sowieso geboden. Juist nadrukkelijker door de 5 mm-eis, maar ook door de vorm zelf met 48 m lengte. Het uitzwenken en voegovergangen zijn schuin, dus alle afwijkingen zijn cruciaal in het eindproduct.

De 5 mm-eis was niet technisch, maar voor het uiterlijk. Opzichtige overgangen waren niet welkom. Dat het geen auto is, is duidelijk, maar de benadering wel. De architect snapt dat het een ruw staalproduct is. De eis was feitelijk overal te respecteren en generiek over het project uitgesmeerd.

Controle

Door tussentijdse monitoring kon worden bijgestuurd, bijvoorbeeld in de lasvolgorde.



Monitoren gebeurt op gezette tijden.

Monitoren gebeurt op gezette tijden, wel in een continu proces, maar met vaste meetmomenten. In een bepaald stadium van de constructie, zoals de hoofd draagpunten die klaar zijn voordat ze gefixt worden, dus voor het lassen, wordt ingemeten of ze met een paar millimeter nauwkeurig er instaan zodat naderhand tot op een honderdste millimeter de gaten er nog uitgekotterd kunnen worden, zodat duidelijk is dat de (laswarmte) vervormingen nog juist weggemachined kunnen worden. Dat moet voor het lassen, daarna zit het vast, en is corrigeren (vrijwel) onmogelijk.

Dát komt dus door vakmanschap.

De brug is bovendien uitbreidbaar. De val heeft een bepaalde lengte. Maar die kan worden aangelengd omdat er geen ballastkelder is – met beperkingen –, en de ballastmast kan in het oneindige worden gestapeld.

De controlemetingen zijn puur, achteraf gezien, bedoeld om te bevestigen dat het object is geworden wat volgens het model moest.

Brugdekken

De brugdekken van de Prins Clausbrug zijn eveneens onder de hand en daardoor ondersteboven gebouwd in een tegenstelde mal, om ervoor te zorgen dat na omkeren de vorm exact conformeerde aan het opgegeven

model. Om de aanbruggen te keren voor de afbouw moesten ze op trailers naar buiten worden gereden, om te worden gekanteld door vier kranen.

Die afbouw behelsde het positioneren en uitlijnen van de leuning. Vanwege de vormgeving moest ook hier veel en nauwkeurig worden gemeten. Alle leuningdelen zijn uniek genummerd. Na lassen van de leuning op de brug zijn ze thermisch verzinkt (bad) en voorzien van een tweelaagse poedercoating.

De brug is opgelegd op exacte, fictieve steunpunten zodat de maten klopten, daarna is het hekwerk erop gezet, afgelast, gedemonteerd (de bevestiging is gebout) en toen geconserveerd.

Val, ballastmast en pendelstaaf

Ook de bouw van het val, de ballastmast en de pendelstaaf betreft ook vakmanschap. Net als de aanbruggen zijn ook de dekken van het val ondersteboven gebouwd. Deze delen zijn binnenshuis gekeerd en tegen de, in positie gebouwde, hoofdligger aangebouwd. Ook hierin speelde maatvoering een grote rol. Tijdens het samenstellen en het aflassen zijn doorlopend metingen uitgevoerd.

De mal, een eigenfabricaat op aanwijzen van Iv, is ontworpen op de zettingen na het lossen uit de mal, het doorhangen vanwege eigengewicht. De stalen mal is cruciaal in de uiteindelijke vorm. Het meten van het geheel is met een laser gedaan.

Het dek is gemetalliseerd via spuitapplicatie. De buitenwand van de ballastmast is gemaakt van dikke platen. Na aflassen, werd de stalen ballast aangebracht waarna de mast is dichtgemaakt. De pendelstaaf is in liggende positie gemaakt en gemeten.

Het val, de ballastmast en de pendelstaaf zijn na het aflassen, volledig ingemeten en vergeleken met het 3D-model waaruit bleek dat er geen of zeer weinig afwijkingen zijn gemeten. Op basis van deze meting zijn alle machinale standaardbewerkingen specifiek uitgevoerd. De op te lassen elementen zijn met een bepaalde overdimensionering (materiaaltoeslag) gemonteerd en worden naderhand met precisiemateriaal (beitels, frees etc.) op de juiste maat gebracht. In het val zijn haakse hoeken gefreesd, waarop de ballastmast



Brugval en de ballastmast vanaf de waterkant ingehesen.

komt. De draaipunten aan de ballastmast en de andere draaipunten zijn mobiel gekotterd. Na veel laswerk en mobiel verspanen zijn de delen gestraald, gemetalliseerd en voorzien van het coatingsysteem.

Na conserveren zijn de leuning gemonteerd. De hoofd draaipunten en -assen zijn aan het val gemonteerd, voordat het op transport ging. De ballastmast wordt in balans gehouden door de pendelstaaf. Om geen extra drijvende bok te hoeven inzetten, is ervoor gekozen om de ballastmast en pendelstaaf al op het terrein in Vlissingen samen te stellen. Hiervoor is een gecombineerd hijs- en transportframe ontworpen.

Tijdens de bouw van de betonconstructie, zijn maatvoeringen uitvoerig gecontroleerd, om er zeker van te zijn dat de stalen delen naadloos zouden aansluiten op de ankers van de onderbouw.

Hijsen, transport en montage

Vanwege de bijzondere vormen was het een redelijke opgave om de juiste hijsvoorzieningen te construeren. De hijsvoorzieningen voor de combinatie ballastmast-pendelstaaf vormden de grootste inspanning, en het grootste gewicht.

Doordat de diverse brugdelen geen symmetrische vorm hebben, was de ligging van het

zwaartepunt bepalend voor de locatie van de hijspunten. Om te voorkomen dat er grote, opvallende hijsogen op de brugonderdelen kwamen, is gekozen voor een ingenieus hijsframe dat ook voor het transport en kantelen gebruikt kon worden. Een *cradle* letterlijk als wieg waarin 'baby's' liggen. De wieg wordt gehesen om de werkstukken te ontzien.

Een belangrijk werkstuk is behandeld in een bad met vloeibaar stikstof, van -370 graden Celsius, daardoor krimpt het werkstuk een halve tot hele millimeter. Bij opwarmen op kamertemperatuur zit het onderdeel, het lagerstoel, moervast.

Met een walkraan zijn de brugdelen in Middelburg geladen in een binnenvaartschip, die ze naar Dordrecht heeft gebracht. In Dordrecht zijn de delen met een HEBO-Lift 5 geplaatst, een drijvende bok met 160 ton capaciteit.

Na aankomst in Dordrecht zijn het brugval en de ballastmast vanaf de waterkant ingehesen. Maar eerst is de pendelstaaf (35 ton) gekanteld en met walkranen in de ballastmast gehesen. Samen zijn ze op het transportframe geplaatst en in één keer aan boord van een ponton gehesen. Het totale hijsgewicht bedraagt 380 ton.

Hillebrand en HEBO ontworpen samen het frame waarop de brugdelen worden gehesen

Projectgegevens

Ruim voor de aanbesteding besloten Dura Vermeer en Hillebrand om dit project samen op te pakken. In deze combinatie zijn eerder beweegbare bruggen gerealiseerd. Dura Vermeer is hierin specialist in de betonnen onderbouw en Hillebrand in de stalen bovenbouw. Gezien de grote complexiteit en focus op kwaliteit was het noodzakelijk de juiste expertise in het team te hebben. Al zijn snel dus meer partners aangehaakt:

• Iv-Infra, constructeur met specialistische kennis van beweegbare bruggen • Hakkers, specialist in watergerelateerde werkzaamheden zoals fundaties en geleidewerken • Langezaal & Inniger, voor elektrotechnische werkzaamheden en een bekende van de gemeente Dordrecht • MTS, voor hydraulische installaties • HEB0, voor transport en montage van de stalen bovenbouw • MZ Bekistingen • Diepstraten Wapeningsstaal



Productie bij de staalbouwer.



Eén hijsblok om zo het draaien in de haak mogelijk te maken.

en gekanteld. De grote inspanning hierbij was dat de hijspunten onder het zwaartepunt liggen en ook nog eens dicht op elkaar. Bij het kantelframe wordt de ballastmast over de op het frame vastgezette draaipunten gedraaid. Bij het brugval van 266 ton zijn twee hijspunten op het dek gebruikt om de stroppen aan elkaar vast te maken en twee hijsbanden rondom de kokers tussen de lagers. Bij het

laden van de brugval is alles in één hijsblok gehesen om zo het draaien in de haak mogelijk te maken. Bij de installatie worden twee hijsblokken gebruikt om zo de brug gecontroleerd schuin weg te leggen.

Installaties

Maar met alleen een onder- en bovenbouw is er nog geen beweegbare brug. Hiervoor

zijn de elektrotechnische en hydraulische installaties essentieel. Daarom zijn Langezaal & Inniger (elektrotechnische installatie) en MTS (hydraulische installatie) ook al vanaf het begin aangehaakt en hebben ze het hele traject vanaf het allereerste ontwerp tot de oplevering meegelopen.

De hydraulische aandrijving was geen eenvoudige opgave, want de dubbelwerkende cilinders zitten aan de (ontwerp)grenzen.

Vanwege de omvang van het val is gekozen voor een aandrijving met een deels gesloten systeem, zodat de cilinders op voorspanning blijven tijdens bewegen. Hierdoor is het val goed onder controle te houden.

De aandrijving bestaat uit twee pompsets met elk een elektromotor van 90 kW. De pompen worden elektronisch flowgeregeld aangestuurd. Tijdens het openen van de brug leveren ze olie aan de bodemzijde van de cilinder. Tijdens het sluiten, waarbij de olie aan stangzijde van de cilinder wordt aangevoerd, komt er meer olie van de bodemzijde terug. Deze olie wordt door één van de pompen afgevoerd naar een roestvast stalen reservoir van 2750 liter.

Mocht een pompset in storing raken, dan is het mogelijk om met de andere pompset de brug te openen en sluiten, maar dan op halve snelheid. En mochten beide pompsets niet meer functioneren, dan is er nog een noodstelsel, waarmee de brug toch nog op langzame snelheid bediend kan worden. Staat de brug open en er treedt een stroomstoring op, dan kan de brug op eigengewicht sluiten. Een belangrijk onderdeel van het ontwerp van de elektrotechnische installatie is de integrale veiligheidsbeschouwing. Een brug kent namelijk vele veiligheidsvoorzieningen, zoals camera's, slagbomen en seinen, die allemaal op de juiste manier moeten worden ontworpen en aangestuurd. Hart van de elektrotechnische installatie bevindt zich in de sokkel.

Hier staan de vijf besturingskasten die voor aansturing van de brug zorgen en communicatie met de bediening op afstand.

Voor de ingebruikstelling zijn alle functies uitvoerig getest met een Site Acceptance Test (SAT). Het ging om honderden tests van de installaties, apart en gecombineerd. Hierbij werd ook de beheerder betrokken, voor een direct en correct gebruik. •