

FENIX II

ROTTERDAM

TORNADO



It's all about

Rotterdam een beetje mooier maken is het motto van Droom en Daad. Dat doet de stichting door het ontwikkelen van nieuwe culturele projecten en het stimuleren van creatieve initiatieven. Fenix, kunstmuseum over migratie, is hun grootste project tot nu toe. We spreken Léon Wielaard, uitvoerend opdrachtgever en vastgoedontwikkelaar van Droom en Daad.

Foto's: Ossip van Duivenbode



movement





Achterzijde museum ligt aan het Deliplein in Katendrecht.



Nieuw icoon in het Rotterdams straatbeeld.



Jaren '20-architectuur herboren en modern element toegevoegd.

Laten we bij het begin beginnen. Hoe is het idee voor Fenix ontstaan?

'Droom en Daad is opgericht in 2016. Wim Pijbes, onze directeur – voorheen directeur van het Rijksmuseum en de Kunsthal –, fietste kort na zijn aanstelling door de stad om inspiratie op te doen voor mogelijke projecten en kwam in de Fenixloods terecht. Daar zaten tijdelijke gebruikers in: Fenix Food Factory, Circus Rotjeknor en Codarts. De gemeente wilde het pand, net als Fenix I, herontwikkelen tot appartementencomplex. Pijbes vond dat zonde. Deze plek is zo markant voor de stad en er is zoveel gebeurd, laten we daar een publieke functie van maken, vond hij. Dat idee is gepitcht bij de gemeente en vond zijn weerklink. In 2018 is het pand aangekocht en zijn we meteen gestart met plannen maken.'

Wat is de gedachte achter het museum?

'We begonnen met het idee van een landverhuizersmuseum. Dit is immers de plek vanwaar drie miljoen mensen vanuit Europa naar Amerika en andere bestemmingen vertrokken. Dat verhaal wilden we een podium geven. Toen we het gingen uitwerken, evolueerde het naar een breder verhaal. Migratie is immers van alle tijden; mensen verhuizen voor geluk, voor veiligheid, voor geld. Dat belicht het museum, met kunst die refereert aan dat thema.'

Jullie hebben de loods gerestaureerd in oorspronkelijke stijl teruggebracht. Wat moest er allemaal gebeuren?

'Het complete pand is gestript, zodat we goed zicht hadden op de staat van het gebouw. Ons doel was om de jaren '20-ar-

chitectuur weer zichtbaar te maken. Dat was vooral heel veel schoonmaakwerk, alles was geschilderd en geplamuurd. Veel betonnen kolommen waren zwaar beschadigd en zijn hersteld met epoxy-injecties. De oude stalen kolommen zijn met laser schoongemaakt en afgelakt. Aan de pleinkant zitten de oorspronkelijke puien er nog in. Die zijn gerestaureerd en voorzien van monumentenglas. Een mooi detail vind ik dat ze in de oorspronkelijke groene kleur zijn geschilderd. Aan de kadekant zijn nieuwe stalen puien geplaatst. Er is voor staal, en niet voor aluminium, gekozen vanwege brandveiligheid.'

'De constructie hoefde niet te worden versterkt, hij is immers berekend op goederenopslag. Wel was het pand enorm verzakt: tussen de noord- en zuidkant zit



1925

Foto: P. Groenendijk



1925

Foto: Stadsarchief Rotterdam



1925

Foto: Stadsarchief Rotterdam



1944

Foto: E. A. Hoi, Centraal fotoersbureau, Stadsarchief Rotterdam



1947

Foto: Sem Presser, MIA



1950

Foto: Stadsarchief Rotterdam



±2005

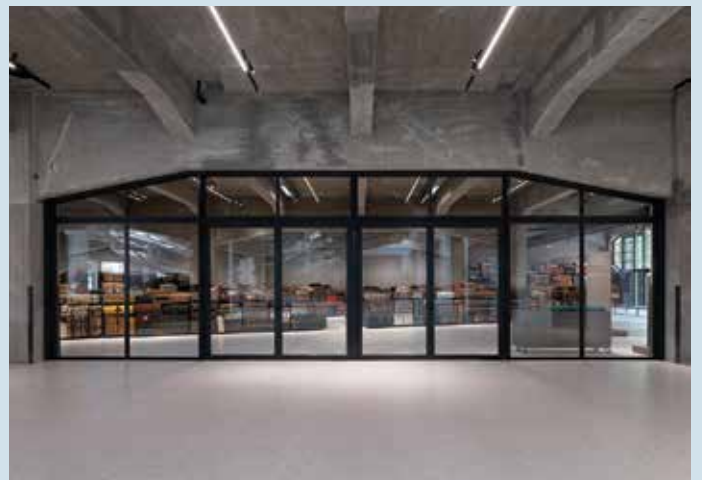
Foto: Rosa G. | Flickr

Geschiedenis

- 1923 – Holland-Amerika Lijn geeft architect Cornelis van Goor de opdracht om tegenover hun hoofdkantoor (het huidige Hotel New York) en uitkijkend op de kades vanwaar miljoenen mensen per schip zouden gaan vertrekken, een loods te bouwen voor de op- en overslag van goederen. Dit pakhuis heet de San Franciscoloods en is destijds met 360 m lengte de grootste loods ter wereld.
- 1945 – Duitse troepen blazen de kades op om te zorgen dat de geallieerden niet kunnen landen en transporteren. De loods loopt zware schade op, de gevel aan de kadezijde is deels weggeblazen.
- 1948 – Een brand verwoest het middengedeelte van de

- loods. Net als de mythische Phoenix verrijst het pand uit de as. Niet als één gebouw, maar in twee afzonderlijke delen: Fenixloods I en II. Met een F, want met *Phoenix* kon de Rotterdammer niet uit de voeten.
- Jaren '50-'90 – Decennialang gebruiken havenbedrijven Fenix I en II als opslagruimten. In de jaren '80-'90 raken ze in verval. Incidenteel worden de loodsen nog benut voor opslag, vlooiemarkten of als locatie voor filmopnamen.
- Begin 21^e eeuw – Fenix II krijgt een nieuwe rol als culturele broedplaats. Stichting Circus Rotjeknor en de internationale kunstvakhogeschool Codarts vestigen zich in het pand. Op de begane grond huist de Fenix Food Factory, een 'hip' horecaplein met kleine foodondernemers.

- 2018 – Stichting Droom en Daad, opgericht en gefinancierd door de Rotterdamse vastgoedfamilie Van der Vorm, verworft Fenix II en transformeert het tot museum. Ma Yansong van MAD Architects krijgt de opdracht om het ontwerp te maken. Hij is de eerste Chinese architect die een museum in Europa ontwerpt. De historische havenloods wordt zorgvuldig gerestaureerd en Yansong bedenkt een futuristische toevoeging aan de ruim honderd jaar oude loods: de Tornado.
- 2025 – Na een intensieve ontwerp- en bouwperiode van vijf jaar is het nieuwe museum gereed. Koningin Máxima verricht de officiële opening op 15 mei 2025, in bijzijn van honderden meters toeschouwers.



Het museum toont verhalen over liefde en afscheid, over thuiskomen en thuis voelen, over het navigeren van identiteit of zoeken naar geluk. Er is een vaste tentoonstelling met werk van internationale kunstenaars, een kofferdoolhof met reizigersverhalen en een fotoexpositie.

een verschil van 30 cm. De kadekant, in de oorlog opgeblazen en in de jaren '50 opnieuw opgebouwd, is meer solide dan de nog oorspronkelijke straatzijde, die een zwakkere fundering heeft.' 'Door die verschillende bouwperiodes en de toevoeging van de Tornado, die staat als een huis, hebben we nu verschillende gebouwde- len die ten opzichte van elkaar bewegen. Aan IMd hebben we de opdracht gegeven om zo te detailleren dat het in ieder geval tien jaar breukvrij blijft. Dat houden we bij en het valt tot nu toe mee, gelukkig.'

De Tornado is het meest spraakmakende onderdeel van Fenix II. Was het vanaf de start jullie insteek om zo'n iconisch element aan het pand toe te voegen? 'We hadden wel het idee om iets met een uitkijkpunt te doen, maar dat begon heel functioneel, gewoon een trap naar een platform met uitzicht over de stad. Pijbes kende MAD Architects en benaderde hen om eens mee te denken over het ontwerp. Hij vond dat zij met hun organische stijl echt iets konden toevoegen aan de stad. Toen Ma Yansong, oprichter MAD, voor het eerst rondliep in de

loods was hij heel stil, keek alleen maar om zich heen en zei toen: 'it's all about movement'. Vervolgens maakte hij de inmiddels beroemde schets, die was spot on. Daar zijn we mee verder gegaan. De Tornado is exact zo geworden als hij toen in een paar halen op papier zette.'

De Tornado is midden in het gebouw, in een gat, geplaatst en lijkt te zweven. Hoe is dat gelukt? 'Het gat zit op de plek waar de tijdelijke gebruikers Rotjeknor en Codarts ook al een



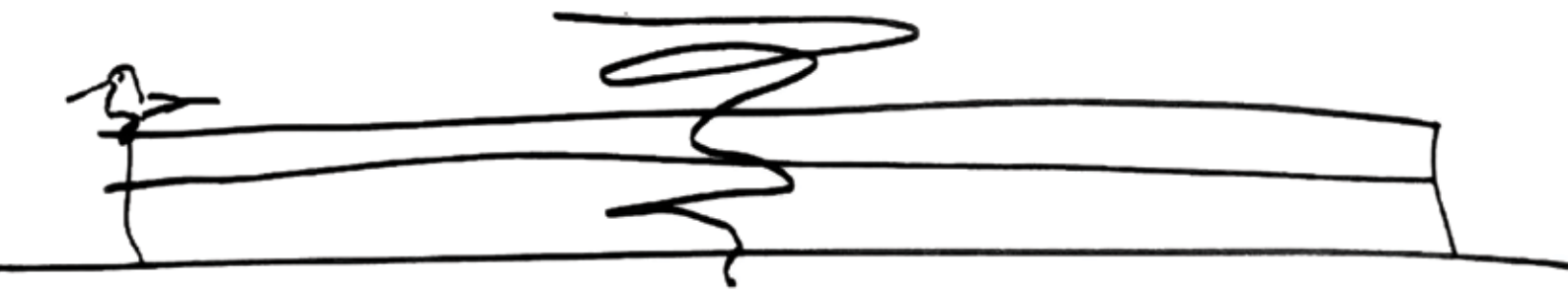
opening hadden gemaakt. Die hebben we iets groter gemaakt. Toen we met de eerste schets van MAD naar Imd Raadgevende Ingenieurs gingen, begon de constructeur meteen kolommen eronder te tekenen. Dat was niet de bedoeling, wij wilden de ruimte zo clean mogelijk houden. Dat vond hij wel een uitdaging en daarmee zijn we verdergegaan binnen het ontwerpteam. Aanvankelijk was de constructie verbonden aan de oude loods. Dat was een risico vonden wij, maar ook Imd. Zo werd de constructie steeds compacter tot de uiteindelijke lobbybox waarin hij nu staat. Die wilden we maken met zo min mogelijk steunpunten. En als er dan een moest komen, dan zo goed mogelijk “verstopt”. Hierdoor lijkt de Tornado inderdaad te zweven. Ik denk dat 90% van de bezoekers de steunpunten helemaal niet ziet, terwijl er toch een enorme staalconstructie omheen staat. Ik ben heel blij dat het ons is gelukt.’

De restauratie van de loods en de Tornado en zijn twee compleet verschillende trajecten. Hoe leid je dat als opdrachtgever in goede banen?
 ‘De Tornado en de lobbybox kun je in feite in een weiland neerzetten. Het is een los verhaal en dat hebben we qua projectorganisatie ook zo ingestoken. Wij acteerden zelf, in het kader van risicobeheersing, als opdrachtgever van alle partijen die betrokken waren bij de Tornado. Dura Vermeer stuurde de partijen aan die aan de restauratie van de loods werkten. Die twee sporen kwamen samen in het overkoepelende bouwteam, dat maandelijks bijeenkwam. Die opzet heeft heel goed gewerkt.’

Hoe hebben jullie het opdrachtgeverschap ingevuld?
 ‘We hebben vooral heel erg gestuurd op details. Het concept is snel gemaakt, maar zorgen dat het tot in de puntjes klopt, daar gaat het om. Dat ik van huis uit architect ben, helpt daar natuurlijk bij. Het was een intensief en

langdurig ontwerpproces waarin het ontwerp steeds cleaner en beter werd. De rvs-kwaliteit is bijvoorbeeld vele malen mooier geworden dan de mock-up. We hebben met CIG en CSM eindeloos gekneet aan de constructie en panelen. Hoe wil je die uiteindelijk hebben? Wat zijn de technische limieten waar we tegenaan lopen? Uiteindelijk zijn we tot de essentie gekomen; een trap en een platform, heel strak en zonder poespas.’

Het museum wordt inmiddels druk bezocht en de Tornado krijgt volop aandacht. Hoe leg je een bezoeker uit wat de Tornado is?
 ‘Hij zal ongetwijfeld nog een Rotterdamse naam krijgen: de glijbaan, de wokkel, we hebben al van alles voorbij horen komen. De Tornado is de metafoor van je leven: je zoekt je weg, je verdwaalt, je komt boven en daar is ruimte voor contemplatie. En het is ook gewoon een heel mooi kunstwerk en uitkijkpunt.’ •



On-Europees en futuristisch

De krabbel van Ma Yansong vormde de basis voor het ontwerp van de Tornado. Hij wilde met één groot gebaar het idee van beweging toevoegen aan het monumentale pakhuis Fenix II. 'Dit is een typisch MAD-ontwerp, gedurfd en een tikje futuristisch.'

Het Chinese architectenbureau MAD, opgericht door Yansong in 2004 in Beijing, staat voor dromerige, organische architectuur. MAD wil in zijn ontwerpen de balans tussen natuur en mens herstellen. 'Alle steden zien er hetzelfde uit. Overal zijn rechthoekige vormen, harde materialen. Wij introduceren de natuur in de stedelijke omgeving, met gebouwen die eruitzien als bergen, wolken, of een tornado', vertelt architect en associate partner Andrea d'Antrassi.

Hij werkte vanuit de vestiging in Rome samen met zijn Chinese collega's aan de conceptuele uitwerking van de Tornado. Juist

die combinatie van nationaliteiten, inclusief de Nederlandse partijen in het ontwerpteam, heeft volgens hem een opvallend resultaat opgeleverd. 'Europese ontwerpen zijn over het algemeen minder gedurfd dan in China. Maar Europa heeft naar mijn mening de beste kwaliteit in constructies. Die verschillende kwaliteiten hebben we bij elkaar gebracht en dat heeft iets unieks opgeleverd.'

Symboliek

D'Antrassi was erbij toen Yansong zijn beroemde krabbel op papier zette. 'Als architect wil je een gevoel krijgen bij een gebouw, de

ziel ervan leren kennen. Toen wij het pand voor het eerst bezochten, zaten de Fenix Food Factory en Corcus Rotjeknor er nog. We hebben koffiedronken, alle ruimtes bekeken en we zijn naar het dak gegaan om het uitzicht over de Maas te bekijken. We waren verrast door de industriële schoonheid van het pand. Al rondlopend kreeg Yansong het idee van een *swirl*, om met één groot gebaar het idee van beweging in het pand te symboliseren. Het zijn twee paden die bij elkaar komen, een platform vormen en daarna weer uit elkaar gaan. Mensen zijn vrij om rond te dwalen, hun eigen pad te kiezen en nieuwe gezichtspunten te ontdekken, net als in het leven.'

Drie functies

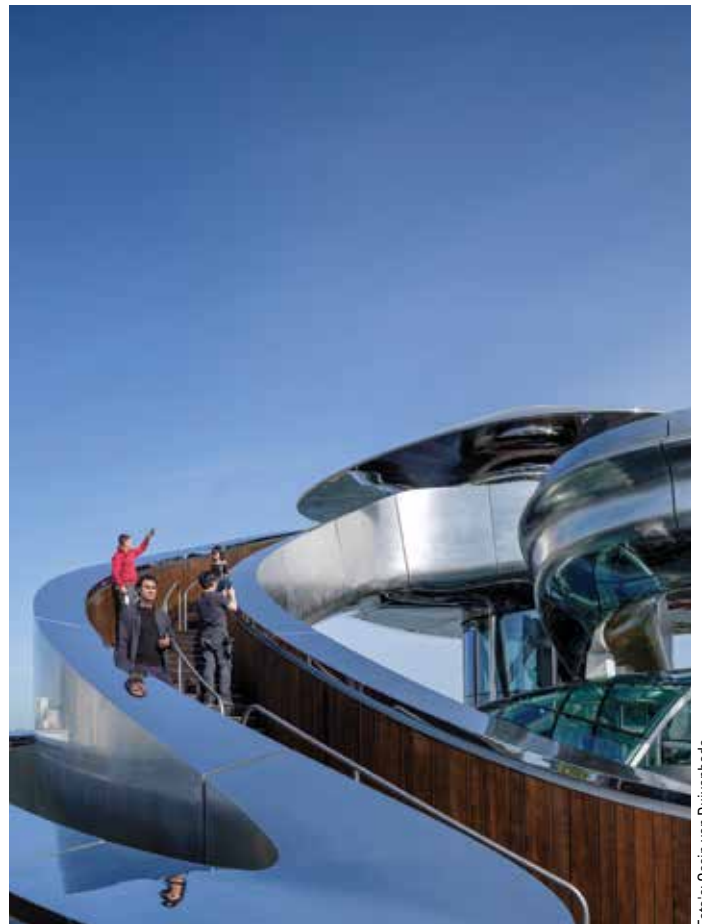
Vrouwelijk en elegant van vorm contrasteert de Tornado scherp met de masculiene,



Trap wervelt door het dak heen van boven naar...



...beneden in de lobbybox.



Combinatie van 'eerlijke' materialen: staal, hout en glas.

Foto: s: Ossip van Duivenbode



Foto: Ossip van Duivenbode

Doorzicht van stadzijde naar de rivier.

rauwe havengebouwen. De lobbybox met de Tornado vervult meerdere functies binnen het nieuwe museum. ‘We wilden ten eerste de straat- en kadezijde met elkaar verbinden. Door twee, recht tegenover elkaar geplaatste, entrees te maken, ontstaat een doorzicht van het Deliplein naar de rivier. Ook van boven valt veel licht in het gebouw door het glasdak. Ten tweede was het de bedoeling om een mooi observatiedek te maken. Het eindpunt van je reis door het gebouw, waar je van het

uitzicht op de rivier en de stad kunt genieten. En we wilden iets unieks voor de stad maken, een nieuwe toevoeging aan de skyline van Rotterdam, van verre herkenbaar om mensen naar het gebouw te trekken.’

Reflectie

MAD koos voor eerlijke, pure materialen: staal, hout en glas. ‘We hebben verschillende materialen bekeken, maar roestvast staal had al snel de voorkeur, ook van de opdrachtge-

ver. Het past bij het maritieme karakter van Rotterdam en is een robuust materiaal, dat niet snel beschadigt en weinig onderhoud nodig heeft. Ook kun je het verschillende behandelingen geven. Door het *shiny* te maken reflecteert het de omgeving en verandert het van kleur met het weer, dat geeft telkens een nieuwe ervaring voor de bezoeker. Voor de traptreden hebben we naar een kunststof variant met houtlook gekeken, maar uiteindelijk toch gekozen voor echt hout.’



Foto: Iwan Baan

Rondom (zelf)reflectie.



Foto: Ossip van Duivenbode

Platformdak biedt panoramisch uitzicht op de Rotterdamse skyline.



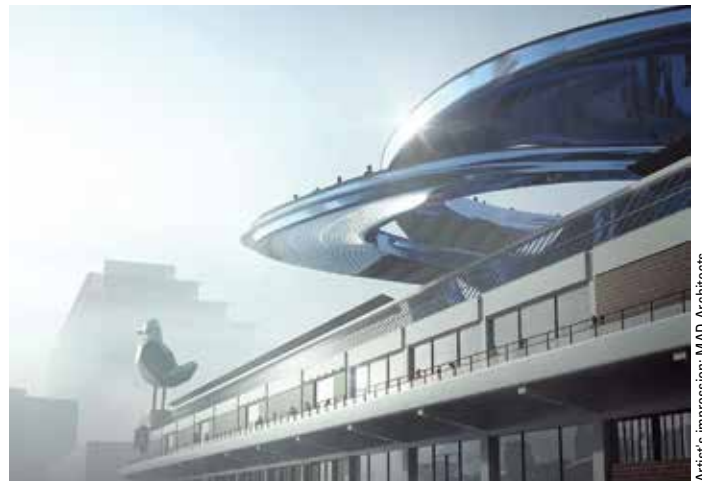
Foto: Iwan Baan

'Shiny swirl'.



Foto: Iwan Baan

Ontworpen 'vanuit de toekomst'.



Artist's impression: MAD Architects

De meeuw bleek te zwaarlijvig.

Tegen de grens

De gerealiseerde kwaliteit van de Tornado is enorm hoog, vindt d'Antrassi. Zeker gezien de complexiteit van het project. 'Dit was alleen mogelijk in samenwerking met top-partners. We hebben meteen in de beginfase aangegeven dat alle partijen ons ontwerp zoveel mogelijk moeten respecteren. Vaak moeten we een ontwerp aanpassen vanwege de technische beperkingen. Met dit team is het gelukt om de technische mogelijkheden op te

rekken om het ontwerp mogelijk te maken. Als je de Tornado nu ziet, met zoveel staal, zo zwaar, maar toch schijnbaar zwevend, met maar een paar ondersteuningspunten. Dat is een enorme prestatie, we zaten echt tegen de grens van wat technisch mogelijk is.'

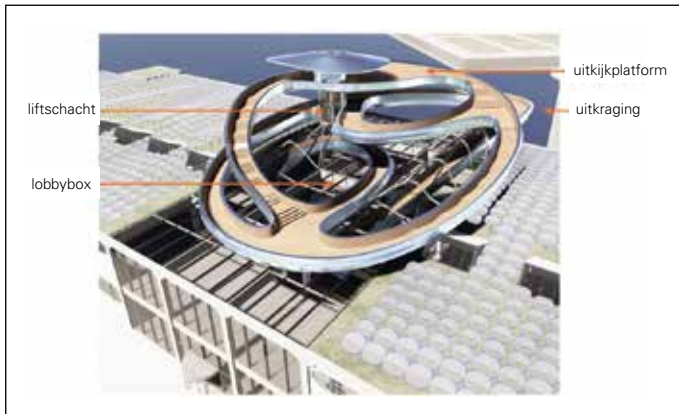
Meeuw

De Tornado is uiteindelijk exact zo geworden als die eerste krabbel. Op één puntje na: de zeemeeuw. Die was bedoeld als metafoer van

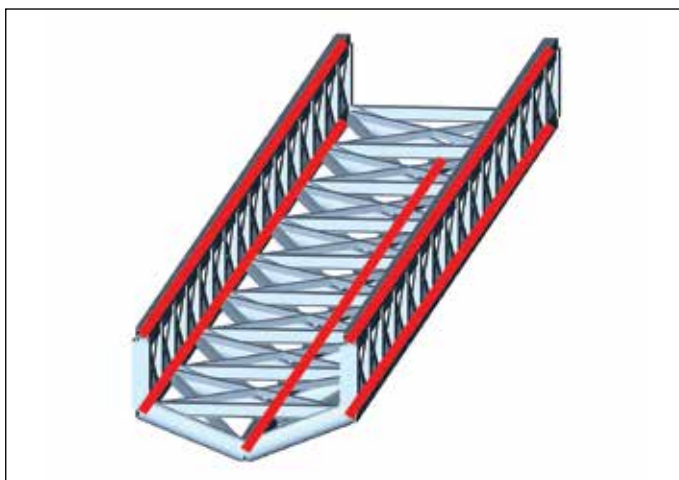
reizen: de meeuw is het laatste dier dat je ziet als je vertrekt, en het eerste als je aankomt op je bestemming. Het bleek echter niet haalbaar om hem zonder zware constructieve ingrepen op het gebouw te zetten. We hebben het hier namelijk over een sculptuur van vijftien meter hoog. Toch is de meeuw niet helemaal uit beeld: hij krijgt naar alle waarschijnlijkheid een plaats boven op het nabijgelegen Danshuis. Ook dat wordt ontwikkeld door Droom en Daad en ontworpen door MAD. •

Dit artikel is gebaseerd op de paper 'Fenix: Shaping a Tornado Structure in a Structured, Integral Approach', K.C. Terwel (e.a.), IABSE Congress Ghent 2025, The Essence of Structural Engineering for Society, Congress Proceedings, Eds. D. Leonetti, H.H. Snijder, B. De Pauw en S. van Alphen, IABSE, Zurich 2025.

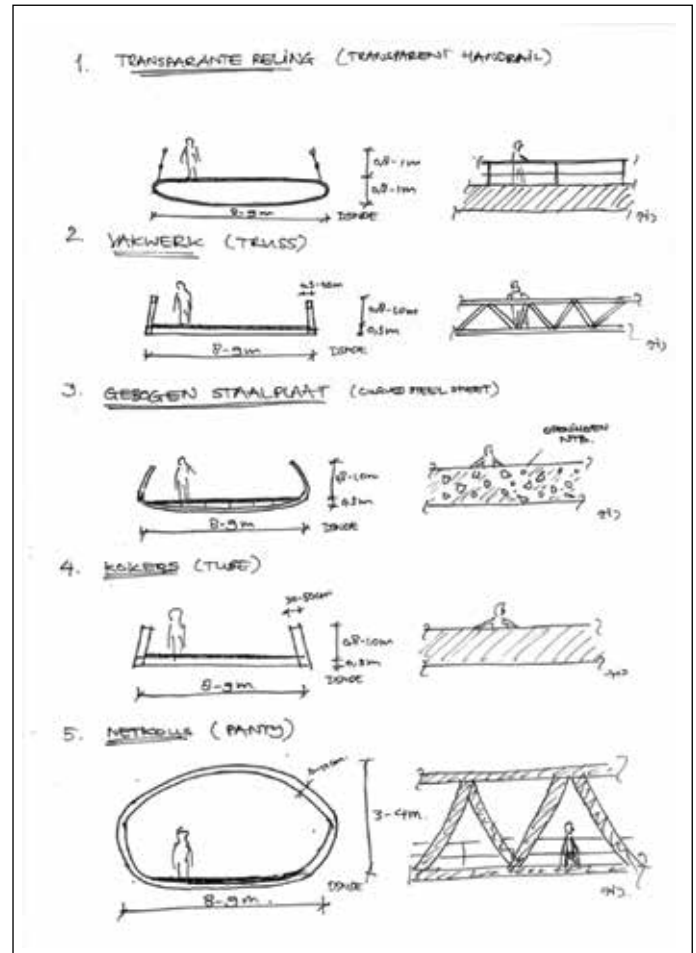
Ongesteunde werveling



1. Elementen Tornado.



3. Constructieprincipe.



2. Ontwerpschetsen diverse alternatieven.

De Tornado, een wervelende trappartij naar een bovendaks uitkijkpunt, binnen de bestaande Fenix-loods II moest 'zweven'. Een minimaal aantal 'onzichtbare' ondersteuning en vele uitkragingen leidden tot een gezamenlijke constructieve speurtocht.

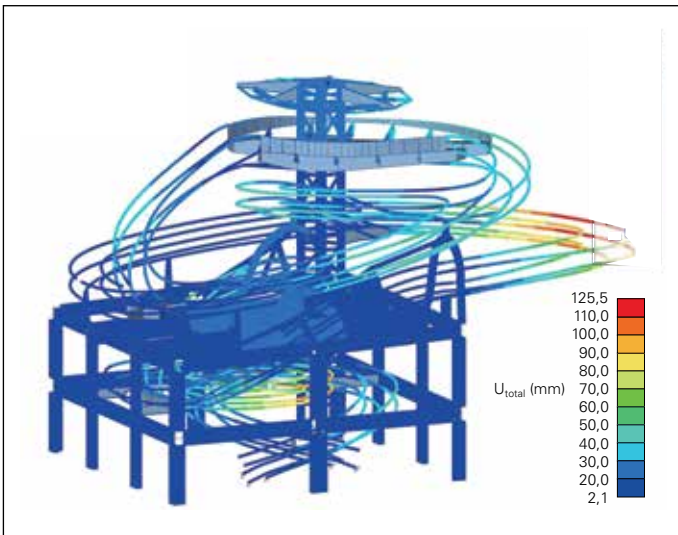
dr.ir. K.C. Terwel RC, ir. L. Wiltjer RC, ir. P. Korthagen RO, ir. A. Herder en ir. A. Vermeeren

Karel Terwel is projectleider/raadgevend ingenieur, Lennart Wiltjer is projectconstructeur en Paul Korthagen is raadgevend ingenieur en partner, allen bij Imd Raadgevende Ingenieurs in Rotterdam. Arnold Herder is projectmanager bij CIG Architecturen in Groningen. Andreas Vermeeren is projectmanager bij CSM Steelstructures in Hamont-Achel (B).

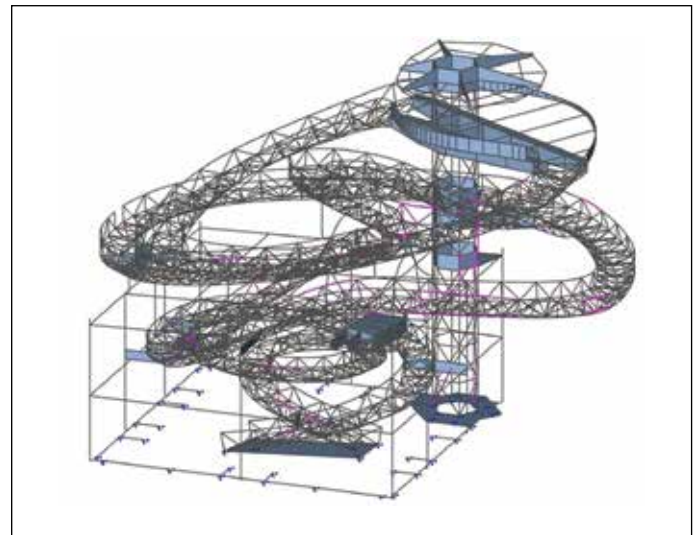
De Tornado werd door opdrachtgever Droom en Daad en MAD Architects beschouwd als kunstwerk. Dat betekende onder meer dat er hoge eisen werden gesteld aan de afwerking

van de constructie. Om tot een haalbaar integraal ontwerp te kunnen komen, koos de opdrachtgever er bij het begin van het project voor om een integraal ontwerpteam samen

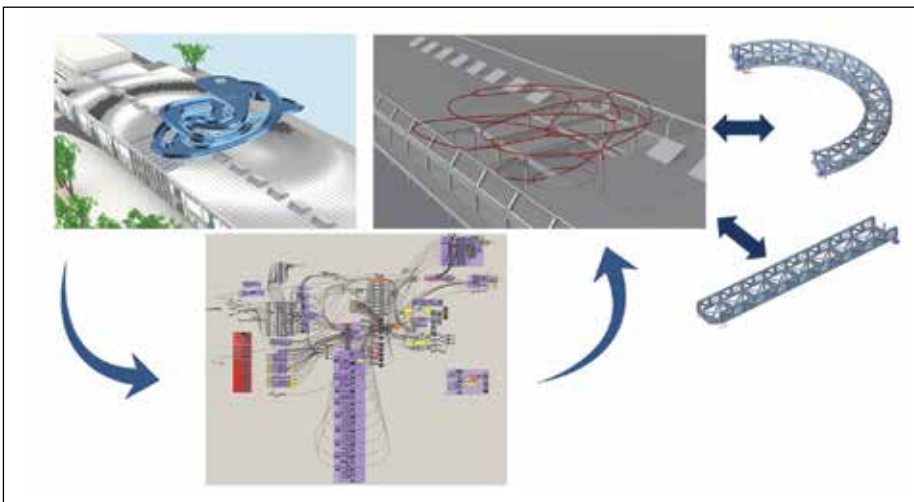
te stellen. Imd Raadgevende Ingenieurs was verantwoordelijk voor het constructieve hoofdontwerp, CSM voor de detailengineering van de staalconstructie en de bouw ervan, en CIG voor de engineering en fabricage van de roestvast stalen binnen- en buitenbekleding. EGM trad op als uitwerkend bouwkundig architect. DURA Vermeer Bouw Heyma werd als hoofdaannemer aangesteld en verantwoordelijk voor onder andere de uitvoering van de fundering. Woodwave sloot in de uitvoeringsfase aan voor de houten trap- en dekbekleding. Daarnaast zijn er diverse adviseurs betrokken voor onder meer bouwfysica en installaties.



5. Berekeningen verticale vervormingen in totale SCIA-model.



6. In roze de elementen die zijn verwijderd voor de robuustheidsanalyse.



4. Proces vormoptimalisatie.

Fasering

De volgende ontwerpfasen zijn doorlopen: Schetsontwerp, Voorlopig Ontwerp, Definitief Ontwerp, Technisch Ontwerp en Uitvoeringsgereed Ontwerp. Het gehele proces werd gekenmerkt door een nauwe samenwerking tussen de partijen met grondige controleprocedures, wat essentieel was om tot een goed geïntegreerd ontwerp te komen van een dergelijke complexe constructie. Om snelle toetsing van ontwerpwijzigingen en optimalisaties mogelijk te maken, is een speciaal ontwikkelde digitale workflow gebruikt als onderdeel van het integrale ontwerpproces. Naast de gebruikelijke procedure waarbij men elkaars werk controleert, zijn er door verschillende bedrijven externe controles uitgevoerd op het funderingsontwerp, dynamisch ontwerp en detailontwerp. De uitvoeringsfase bestond uit het aanbrennen van de funderingspalen, -balken en poeren en de begane-grondvloer. Daarnaast zijn de stalen draagconstructie en de gevelementen in de fabriek vervaardigd, getransporteerd naar de bouwplaats (over de

weg of per schip) en vervolgens op locatie geassembleerd. De relevante keuzes in het ontwerp- en bouwproces worden in de volgende paragrafen verder toegelicht. De belangrijkste elementen van de constructie zijn weergegeven in *afbeelding 1*.

Ontwerpproces draagconstructie

Schetsontwerp en Voorlopig Ontwerp

De architect had als wens dat er sprake zou zijn van een 'zwevende constructie'. Het aantal steunpunten moest dus zo beperkt mogelijk blijven. Bovendien was, vanwege de tornado-vorm, voldoende torsiestijfheid noodzakelijk. Na het opstellen van verschillende schetsontwerpen (*afb. 2*), onderbouwd met handberekeningen, is gekozen voor de optie waarbij de hoogte van de leuning wordt benut als onderdeel van de constructie om voldoende verticale stijfheid te realiseren. Onder het loopdek is een driehoekig ruimtelijk vakwerk voorzien om voldoende torsiestijfheid te garanderen (*afb. 3*). Vervolgens begon een iteratief proces met de architect, waarbij om de twee weken feedback

werd gegeven over het constructieve gedrag van de voorgestelde vorm, samen met suggesties voor vormoptimalisatie. Na vormaanpassingen van de architect toetste de constructeur opnieuw de constructie (*afb. 4*). Dit resulteerde in de definitieve positionering van de steunpunten. Met deze iteratieve benadering werd, zij het nog niet in detail, duidelijk welke constructie nodig was om aan de constructieve eisen te kunnen voldoen. Hierbij is gepoogd om een eigenfrequentie van de constructie te realiseren die overal boven de 3 Hz zou liggen. Dit was een opgave, met name bij enkele uitkragende delen.

Definitief Ontwerp

In deze fase is aandacht besteed aan de nadere invulling van de constructie. Er is definitief gekozen voor een aparte tafelconstructie, de *lobbybox*, waarop de Tornado zou komen te rusten en die met de liftkern de stabiliteit kan verzorgen. Hiermee is het niet nodig om af te steunen op de bestaande constructie. Aangezien de invloed van verschillende ondersteuning niet volledig kon worden afgeleid uit het lijnmodel, is in deze fase het lijnmodel gecombineerd met het 3D-model van de liftschacht en lobbybox.

Technisch Ontwerp

Vastleggen vorm

Na het vastleggen van de hoofdvorm moest het model verder worden uitgewerkt om de benodigde afmetingen van de ruimtelijke vakwerkconstructie in detail te bepalen en om het gedrag van de constructie nauwkeuriger te kunnen voorspellen. Daarom is een volledig 3D-model opgesteld, gebaseerd op een script van CIG. Dit script bevatte randvoorwaarden vanuit verschillende disciplines, waaronder factoren zoals de minimale helling voor regenwaterafvoer en de minimaal vereiste constructiehoogte, zodat de constructie voldoet aan zowel de architectonische, instal-

latietechnische als constructieve eisen. Daarnaast hield het script rekening met uitvoeringstechnische uitgangspunten van de staalbouwer, zoals beperkingen van minimale en maximale verbindingshoeken en benodigde bouwtoeranties. Door dit script te gebruiken voor het genereren van het constructiemodel, is een naadloze vertaling van het berekende ontwerp naar een uitvoeringsgereed model mogelijk gemaakt, dat door de staalbouwers kon worden gebruikt. Met deze input werd de lay-out van het ruimtelijk vakwerk, de liftschaft en het uitkijksplatform afgerond en kon een gedetailleerde analyse van het constructieve gedrag worden uitgevoerd. Allereerst is gecontroleerd of de toelaatbare spanningen (incl. partiële veiligheidsfactoren) niet werden overschreden, maar in de meeste gevallen waren stijfheid en dynamisch gedrag bepalend. Daarnaast zijn de oplegreacties bepaald als input voor het funderingsontwerp.

Dynamisch gedrag

De grote overspanningen en uitkragingen van de Tornado leidden tot een aparte opgave: hoe zorg je voor acceptabel dynamisch gedrag? Gezien de locatie en het beoogde gebruik als publiek toegankelijke ruimte, moet de constructie bestand zijn tegen zowel door mensen veroorzaakte trillingen als trillingen door windbelasting. In plaats van simpelweg de stijfheid te verhogen door meer materiaal toe te voegen, zijn geavanceerde simulaties met een eindige-elementenmethode (SCIA Engineer) en dynamische berekeningen (combinatie SCIA Engineer en zelf ontwikkelde *respons*-modellen) toegepast. Het doel was om ervoor te zorgen dat het tornadovormige kunstwerk deze dynamische belastingen kan weerstaan zonder concessies te doen aan de veiligheid of het comfort van bezoekers. Het comfortniveau is geverifieerd door de opdrachtgever in een vluchtsimulator verschillende trillingsniveaus te laten ervaren.

Op die locaties waar alleen vanwege potentieel onacceptabel dynamisch gedrag extra materiaal nodig zou zijn, is in plaats van telkens verstijven van de constructie ervoor gekozen om op een aantal posities ruimte te reserveren voor Tuned Mass Dampers (TMD's)



7. Overzicht fundering binnen het bestaande gebouw.

en na inmeting van het werkelijk gedrag te besluiten of deze dempers daadwerkelijk zouden moeten worden toegepast. In werkelijkheid zou het constructieve gedrag immers anders kunnen zijn dan de rekenmodellen, omdat bijvoorbeeld de stijve, stalen bekleding niet was meegenomen voor de stijfheid van de constructie (voor uitgebreidere uitleg van het dynamisch gedrag, zie p. 38-41).

Robuustheid

Vanwege de publieke functie van de Tornado werden hogere eisen gesteld aan de robuustheid. Daarom zijn 54 elementen geselecteerd die mogelijk kritisch konden zijn voor de veiligheid. Vervolgens is een modelleringsaanpak ontwikkeld en uitgevoerd waarbij deze elementen één voor één uit het hoofdmodel zijn verwijderd en het model opnieuw is doorgerekend (afb. 6).

De constructieve analyse toonde aan dat het merendeel van de elementen zonder veiligheidsproblemen kon vervallen. De vakwerkconstructie vertoonde een hoge mate van robuustheid en de mogelijkheid tot herverdeling van krachten, dankzij de combinatie van twee zijliggers en het driehoekige ruimtelijke vakwerk onder het looppad. Enkele elementen (zoals de ondersteuning) bleken essentieel te zijn voor de constructieve veiligheid. Deze elementen zijn aangemerkt als sleutelementen, waarvoor hogere veiligheidsfactoren golden en die tijdens de uitvoering extra aandacht kregen. Voor sommige lasverbindingen was het robuustheidsscenario bepalend, en dit moest worden meegenomen in de engineering van de lassen.

Validatie modellen

In de rekenfase is veel aandacht besteed aan de validatie van de verschillende gebruikte modellen. Het lijnmodel is gevalideerd met handmatige berekeningen. De resultaten uit het lijnmodel zijn vervolgens vergeleken met de eerste uitkomsten van het 3D SCIA Engineer FEM-model. Voor de berekeningen van de stalen verbindingen is een 3D Ansys-model gebruikt, waarvan de resultaten zijn vergeleken met de overeenkomstige uitkomsten van het SCIA-model. Hierbij is erop gelet dat alle geconstateerde afwijkingen tijdens deze analyse ofwel verwaarloosbaar waren, ofwel logisch konden worden verklaard. Deze validaties gaven groot vertrouwen in de juistheid van de modellen die in dit rekenproces zijn gebruikt.

Uitvoeringsgereed Ontwerp

De detaillering van het staalwerk was de verantwoordelijkheid van staalbouwer CSM. Dit wordt in een apart artikel toegelicht (p. 50-57). Tijdens dit proces was er intensieve samenwerking met de constructeur om te zorgen dat de uitgangspunten van het hoofdontwerp goed werden vertaald in/naar het detailontwerp.

Conclusie engineering draagconstructie

Door een gestructureerd proces met verschillende ontwerpfasen kon de constructie van grof naar fijn worden ontwikkeld. Diverse modellen, variërend van eenvoudige handberekeningen tot complexe FEM-modellen, zijn uitgewerkt, waarbij de eenvoudigere modellen uit eerdere fasen zijn gebruikt om de uitkomsten van de meer verfijnde modellen te con-



Foto: Iwan Baan

8. Eindresultaat.

troleren. Daarnaast zorgden ontwerpcontroles op verschillende aspecten voor vertrouwen bij het ontwerpteam, de opdrachtgever en de gemeente.

Bekleding Tornado

Parallel met de hoofd draagconstructie van het spaceframe van de Tornado is de bekleding ontworpen: de 'architectonische huid'. Elke doorsnede bestaat uit drie panelen die samen één constructief systeem vormen, met ruimte voor thermische beweging.

De panelen zijn ontworpen als een verstijfde huidconstructie. Via parametrische en FEM-analyses zijn maatgevende panelen bepaald, wat leidde tot standaardisatie van diktes en verstijvingen. Binnen- en buitenpanelen verschillen in het ontwerp van de verstijving, maar hebben gelijke huiddikte.

De uitvoeringsmodellen voor constructie en fabricage zijn met dezelfde scripts gegenereerd, wat zorgde voor consistentie en efficiëntie. Elk paneelset is afzonderlijk geanalyseerd op sterkte en lasdetails, omdat elk paneel uniek is. In een apart artikel worden de constructie, fabricage en montage van de bekleding nader toegelicht (p. 42-49).

Constructieproces draagconstructie en bekleding

Fundering en begane grond

De fundering van de bestaande loods bestaat uit houten palen. Hoewel de aantasting van de palen heel beperkt is, zijn toch zettingen tot 30 cm waargenomen vanwege de beperkte lengte van de palen. Daarom is besloten om een nieuwe, aparte fundering voor de Tornado aan

te brengen. Vanwege de beperkte werkhoogte in de loods was een gesegmenteerd systeem nodig. Om te voorkomen dat de kwetsbare bestaande palen worden beïnvloed, is gekozen voor een schroefpaalfundering. De stalen buizen zijn met groutinjectie ingeschoefd en daarna met beton gevuld. Deze palen hebben een hoge draagkracht, waardoor een beperkt aantal nodig was.

Vanuit het aangrenzende deel van de loods was bekend dat er mogelijk grote betonblokken in de grond aanwezig zijn. Daarom is op elke paalpositie een proefboring uitgevoerd en zijn diverse obstakels verwijderd.

Op de locaties waar de paalposities niet aangepast konden worden, bijvoorbeeld onder de lobbybox-kolommen, zijn versterkte boorkoppen toegepast. Zo konden de palen toch gemaakt worden, ondanks eventuele obstakels in de grond.

Voor de wapening van de begane-grondvloer zijn de belastingen tijdens de bouwfase bepaald. De tijdelijke ondersteuning voor de Tornado en bouw materieel zorgden namelijk voor hoge puntbelastingen. Deze betonvloer met bijbehorende poeren en funderingsbalken is aangelegd door de hoofdaannemer.

Fabricage en montage

Zowel de stalen draagconstructie als de gevelconstructie zijn eerst in de fabriek geproduceerd, waarna ze getransporteerd werden naar de bouwplaats en ter plekke gemonteerd. In twee aparte artikelen wordt hier aandacht aan besteed (p. 42-49 en p. 50-57).

De combinatie van technische complexiteit en de eis van een zeer hoog afwerkingsniveau

maakte het noodzakelijk om de verschillende stappen van het bouwproces al in een vroeg stadium te analyseren. De productiemethode en montage-logistiek voor elk onderdeel zijn daarom vooraf uitgewerkt om het project uitvoerbaar te maken. Een goede samenwerking tussen ontwerp- en uitvoeringsteams was hiervoor essentieel.

Gezien de esthetische verwachtingen van de opdrachtgever was het ook noodzakelijk om hen gedurende het hele proces te betrekken en duidelijkheid te geven over het eindresultaat. Dit is onder andere bereikt door bepaalde onderdelen in een vroeg stadium van engineering en productie prioriteit te geven, zodat ze als mock-up gepresenteerd konden worden. Enerzijds kon de opdrachtgever zo het afwerkingsniveau bevestigen, anderzijds bood dit het uitvoeringsteam de mogelijkheid om het productie- en montageproces te analyseren en optimaliseren.

Eindresultaat

Een combinatie van praktische overwegingen, geavanceerde engineering, mock-ups en dynamische simulaties in een vluchtsimulator heeft aangetoond dat een speciale ontwerpaanpak nodig was om dit unieke object te realiseren. Internationale literatuur en expertise zijn geraadpleegd bij de ontwikkeling van een eigen dynamisch model. Verschillende second opinions van cruciale onderdelen van de constructie zijn uitgevoerd om de kwaliteit te waarborgen. Het meten van het dynamisch gedrag en het vergelijken met de berekeningen is gebruikt om de dempers te implementeren en af te stemmen, waarmee theorie en praktijk samenkwamen.

Een belangrijke succesfactor voor de engineering is dat het ingenieursteam vanuit verschillende disciplines vanaf het begin in een open en transparante sfeer samenwerkte. In de vroege ontwerpfasen was er ruimte om te verkennen welke uitdagingen er waren en welke partij de juiste expertise had om deze op te pakken. Iedereen was bereid over de grenzen van de eigen disciplines heen te kijken en onconventionele keuzes te maken. Dit was alleen mogelijk doordat de opdrachtgever een geschikte setting verzorgde, waarin ruimte en tijd werd geboden. •

Dit artikel is gebaseerd op de paper 'Fenix Tornado: dynamic behaviour', L. Wiltjer (e.a.), IABSE Congress Ghent 2025, The Essence of Structural Engineering for Society, Congress Proceedings, Eds. D. Leonetti, H.H. Snijder, B. De Pauw en S. van Alphen, IABSE, Zurich 2025.

Zweven zonder beven



1. 3D-rekenmodel.

De Tornado van Fenix II wordt ondersteund door een beperkt aantal kolommen, die zoveel mogelijk aan het zicht zijn onttrokken. Hierdoor ervaren bezoekers de structuur als zwevend. De verschillende overstekende verhogingen de kans op trillingen door massaal belopen van de trap, wat verdere aandacht vraagt.

ir. L. Wiltjer RC, ir. P. Korthagen RO en dr.ir. K.C. Terwel RC
Karel Terwel is projectleider/raadgevend ingenieur, Lennart Wiltjer is projectconstructeur en Paul Korthagen is raadgevend ingenieur en partner, allen bij IMd Raadgevende Ingenieurs in Rotterdam.

Het beperkte aantal ondersteuningspunten bracht aanzienlijke constructieve inspanningen met zich mee, aangezien de grote overspanningen en uitkragingen een sterke invloed hebben op het constructief gedrag – niet uitsluitend op het statische gedrag, maar ook op de dynamische respons van de constructie.

Voorlopige berekeningen

Statische berekeningen met uitgebreid 3D-model

In samenwerking met staalconstructiebedrijven CSM Steelstructures en CIG Architecture is een gedetailleerd 3D-rekenmodel ontwikkeld voor de statische berekeningen. Dit model vormde de basis voor het analyseren van

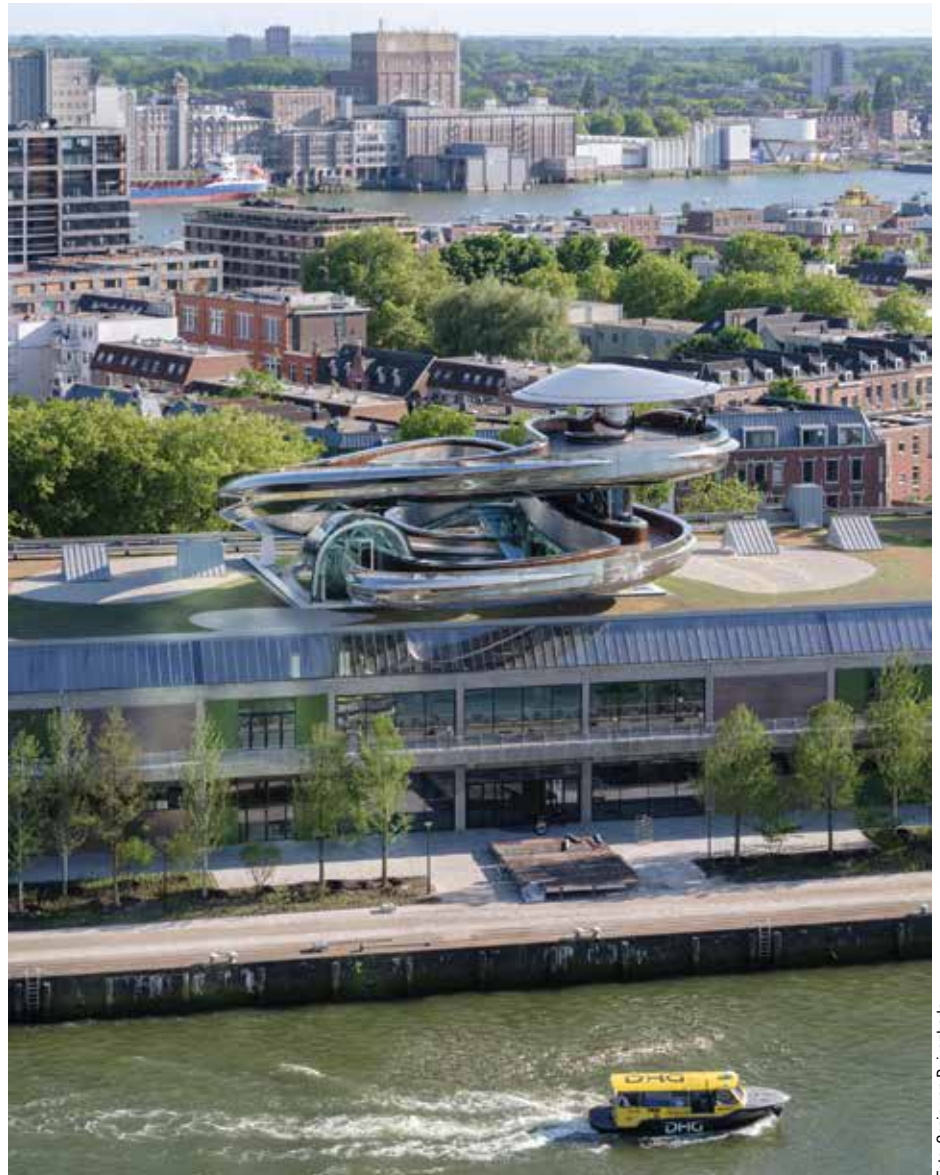


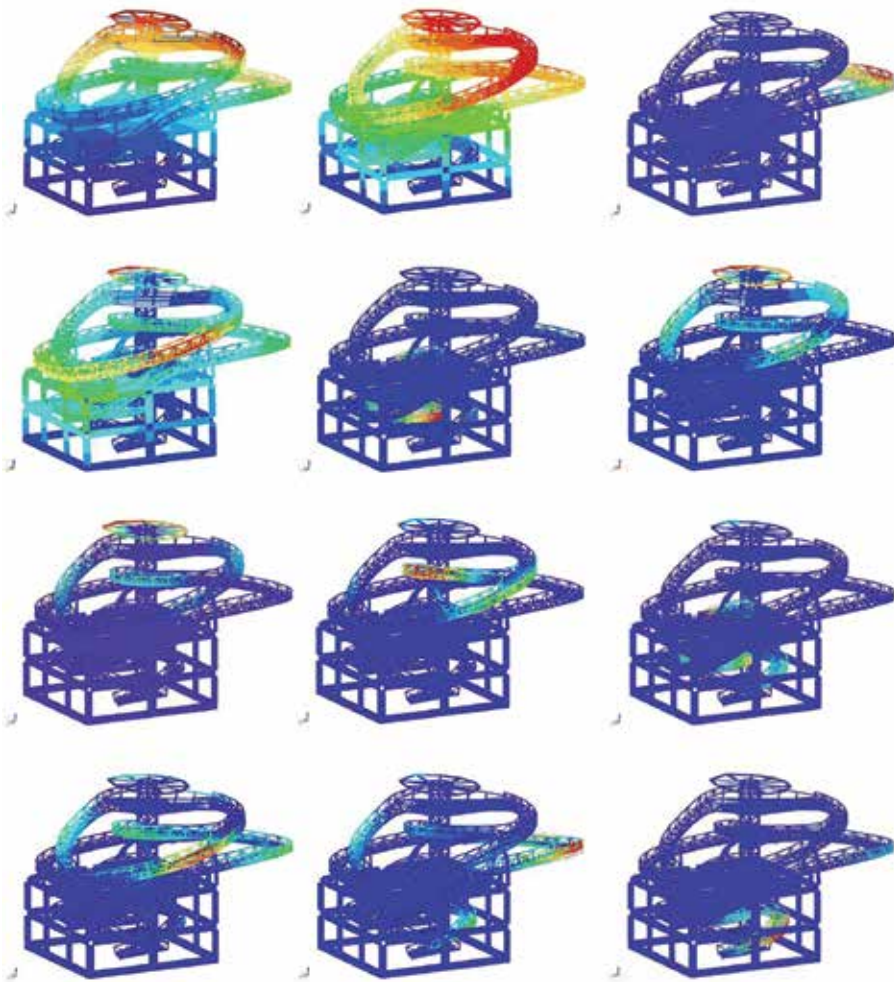
Foto: Ossip van Duitenbode

de integriteit, stabiliteit en stijfheid van de constructie. Geavanceerde rekenmethoden, zoals de eindige-elementenmethode (FEM), zijn toegepast om verplaatsingen, spanningen, rekken en inwendige krachten onder verschillende belastingcondities te bepalen. Deze aanpak waarborgt dat de constructie bestand is tegen de verwachte statische

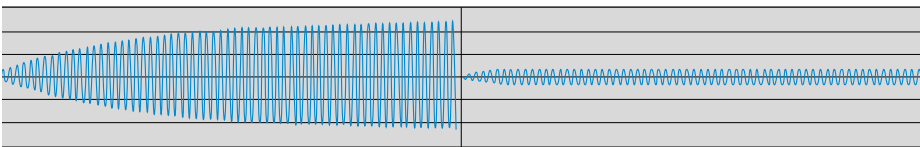
belastingen, zonder concessies aan veiligheid of prestaties.

Dynamische berekeningen en eigenfrequentie-analyse

Vanwege de complexe geometrie van de Tornado en het beperkte aantal ondersteuningen is het – nogmaals – essentieel om niet alleen



2. Selectie eigenfrequenties.



4. Berekende versnellingen met 0,8% demping (links).

5. Berekende versnellingen met 6% demping (rechts).

het statische gedrag, maar ook de dynamische aspecten te onderzoeken.

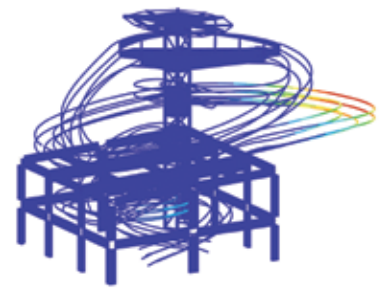
Dynamische berekeningen zijn uitgevoerd om de respons van de constructie door dynamische belastingen te beoordelen. Belangrijke eigenschappen zoals de modale massa en eigenfrequenties zijn bepaald met het 3D-model. De eigenfrequenties, die de natuurlijke trillingsfrequenties van de constructie weergeven, zijn berekend via een modale analyse.

Sommige eigenfrequenties konden direct buiten beschouwing worden gelaten, omdat het in de praktijk onmogelijk is om de benodigde belasting op te wekken om de constructie in trilling te brengen. Een globale verticale modus zou bijvoorbeeld een gesynchroniseerde belasting op alle delen van de Tornado vereisen, wat praktisch onhaalbaar is. Andere eigenmodi verdienen echter wel

aandacht, deels vanwege hun vorm, maar ook omdat hun frequentie binnen het bereik van een normale loopfrequentie ligt. De grote uitkraging heeft bijvoorbeeld een verticale eigenfrequentie van 2,0-2,5 Hz, wat overeenkomt met de gemiddelde stapfrequentie. De vervorming van deze eigenmodus is te zien in afbeelding 3.

Analyse kritieke frequentiegebieden

In de dynamische berekeningen zijn meerdere belastingsscenario's beschouwd, zoals slenteren, lopen, rennen of traplopen. Elk van deze scenario's kent een specifiek frequentiegebied waarin eigenfrequenties kritisch kunnen worden^[1]. Er is nagegaan in hoeverre het frequentiegebied van de verschillende scenario's in de buurt kwam van de berekende eigenfrequenties. Deze analyse is essentieel om te beoordelen of er sprake is van een



3. Vervorming derde eigenfrequentie.



6. Sensor bevestigd aan constructie.

mogelijk resonantierisico op de locatie van de betreffende eigenmodus.

In overleg met de opdrachtgever is ook besloten sommige belastingsscenario's uit te sluiten, zoals marcheren of synchroon dansen met een grote groep.

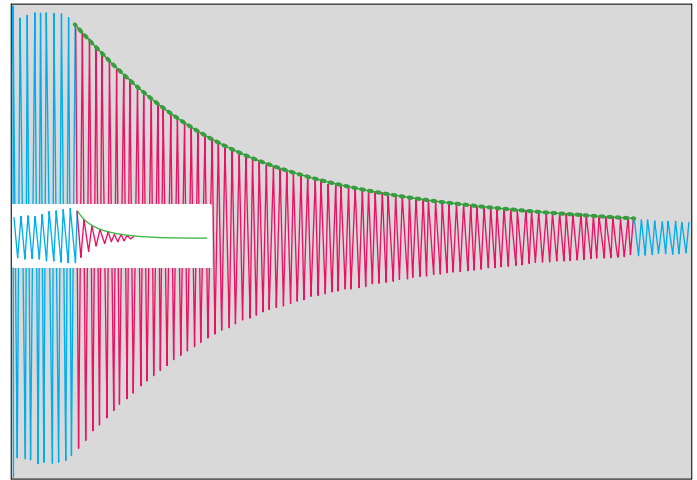
Om de risico's te beperken, zijn verschillende ontwerpaanpassingen overwogen, zoals het vergroten van de stijfheid van de doorsnede om de eigenfrequenties buiten het kritieke bereik te brengen. In sommige gevallen bleek het echter efficiënter – doordat er minder materiaal nodig was met bijbehorende kosten- en duurzaamheidsvoordelen – om het dynamisch gedrag te accepteren en andere maatregelen te treffen, zoals het toepassen van Tuned Mass Dampers (TMD's), in plaats van extra materiaal toe te voegen. TMD's zijn apparaten die trillingsenergie absorberen en daarmee trillingen dempen, waardoor de amplitude van trillingen bij specifieke frequenties effectief wordt vermindert.

Beoordeling dynamische berekeningen

De dynamische berekeningen zijn beoordeeld door ARUP London, waar ruime ervaring aanwezig is over dynamisch gedrag van met name slanke brugconstructies.



7. Geïnstalleerde TMD (foto: Gerb).



8. Verhoogde demping.

Dynamiek in de praktijk

Simulatie versnellingen en besluitvorming door opdrachtgever

Hoewel overmatige versnellingen ongewenst zijn, is enige beweging onvermijdelijk. De vraag blijft: welke versnelling is acceptabel waarbij gebruikers zich comfortabel blijven voelen?

Een vluchtsimulator is ingezet om de opdrachtgever de versnellingen zelf te laten ervaren. Deze interactieve benadering stelde de opdrachtgever in staat om weloverwogen beslissingen te nemen over acceptabele versnellingsniveaus. De simulator bootste de dynamische bewegingen van de constructie na, zowel realistisch als sterk overdreven, om een indruk te geven van de trillingen die gebruikers zouden kunnen voelen. Door deze ervaring kreeg de opdrachtgever beter inzicht in de impact van dynamica op de constructie en konden er passende beheersmaatregelen genomen worden. Deze praktische ervaring was van grote waarde om het ontwerp af te stemmen op de comfort- en prestatieverwachtingen van de opdrachtgever.

De opdrachtgever werd gevraagd om verschillende belastingscenario's te beoordelen op een schaal van 'onmerkbaar' tot 'beangstigend'. Hieruit bleek dat de gekozen grenswaarden voor versnellingen, gebaseerd op literatuur [1], binnen de acceptabele marges van de opdrachtgever vielen. Wel moet worden opgemerkt dat de ervaring in een vluchtsimulator slechts indicatief is, aangezien de werkelijke situatie (buiten en staand in plaats van binnen en zittend) anders kan aanvoelen.

Definitieve berekeningen

Berekening verwachte versnellingen

Op basis van eigenschappen uit het rekenmodel, zoals modale massa en eigenfrequentie, en typische waarden uit de literatuur, zoals demping, konden de verwachte horizontale en verticale versnellingen worden berekend. Voor deze berekeningen is een eenvoudig massa-veersysteem gebruikt om snel verschillende scenario's te evalueren, in plaats van uitgebreide dynamische analyses in FEM-software.

De berekende versnellingen zijn vergeleken met de maximale versnellingen die met de opdrachtgever zijn overeengekomen na de simulatie-ervaring.

In *afbeelding 4* is een grafiek te zien van de berekende versnellingen bij 0,8% demping. Deze grafiek toont de versnellingen bij een continue belasting in de exacte eigenfrequentie. De versnellingen nemen toe totdat een stabiele toestand wordt bereikt. In deze toestand liggen de versnellingen ruim boven de $2,0 \text{ m/s}^2$, waar de grens voor de verticale trillingen is gesteld op $0,7 \text{ m/s}^2$, wat duidelijk maakt dat 0,8% demping onvoldoende is voor deze modus.

Afbeelding 5 toont dezelfde berekening, maar dan met 6% demping. Hieruit blijkt dat de stabiele toestand veel sneller wordt bereikt en, belangrijker nog, dat de maximale versnelling aanzienlijk lager is. Met 6% demping daalt de maximale versnelling van ongeveer $2,3 \text{ m/s}^2$ naar $0,3 \text{ m/s}^2$.

Identificatie kritieke dynamische locaties

Binnen de constructie zijn verschillende loca-

ties geïdentificeerd waar dynamisch kritische situaties kunnen ontstaan. Deze locaties zijn onderverdeeld in drie categorieën: 'vrijwel zeker kritisch', 'mogelijk kritisch' en 'waarschijnlijk niet kritisch'. Voor elke categorie zijn specifieke oplossingen in het ontwerp opgenomen, variërend van hoeklijnen voor de bevestiging van dempers tot voorgeboorde gaten voor eventuele latere installatie van hoeklijnen. Deze aanpak maakt het mogelijk om dempers achteraf eenvoudig toe te voegen als dat nodig blijkt tijdens de gebruiksfase. Het werkelijk gedrag van de Tornado en de beleving van het gedrag kunnen immers in de praktijk enigszins afwijken van de modelberekeningen.

Veiligheid

Hoewel trillingen een gevoel van onveiligheid kunnen geven, is het essentieel dat de constructie nooit bezwijkt, zelfs niet bij zware trillingen. Daarom zijn naast de versnellingsberekeningen ook toetsingen uitgevoerd op de uiterste grenstoestand. Hierbij wordt aangenomen dat de constructie langdurig wordt belast rond haar natuurlijke frequentie. De amplitude neemt dan toe tot een evenwichtssituatie wordt bereikt. De interne krachten die bij deze situatie optreden, vormen de meest extreme dynamische belastingen die kunnen voorkomen.

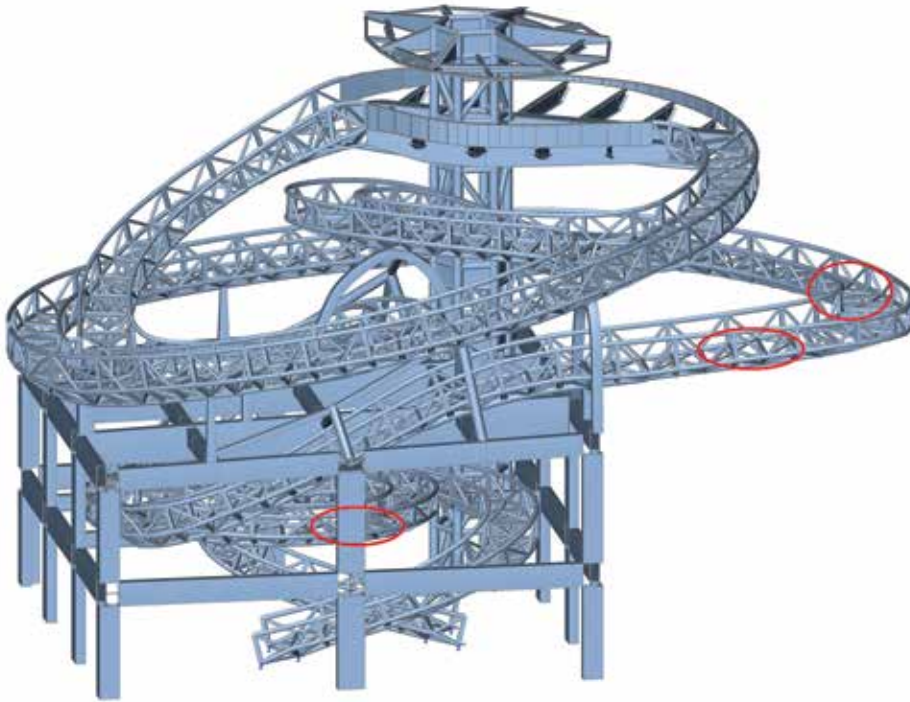
Testen

Dynamische metingen na de bouw

Na voltooiing van de bouw zijn dynamische metingen uitgevoerd om de werkelijke eigenfrequenties en dempingseigenschap-

Literatuur

1. C.P.B. Maury, *Sétra, Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*, academia.edu, 2006.



9. Locaties toegepaste dempers.

pen van de constructie te bepalen. Hierbij worden sensoren op de constructie geplaatst en trillingen opgewekt door één of twee personen die belastingen aanbrachten door op de constructie te stampen. De sensoren zijn zeer gevoelig en kunnen de volledige respons van de constructie meten. Op basis van deze respons kunnen alle eigenfrequenties van het betreffende deel van de constructie worden bepaald.

Deze metingen leverden waardevolle data op voor het verfijnen van de versnellingsberekeningen. De geactualiseerde berekeningen, waarin de gemeten eigenfrequenties en demping zijn verwerkt, zijn gebruikt om samen met TMD-leverancier Gerb te bepalen waar dempers nodig waren.

In de ontwerpfasen werd uitgegaan van een constructieve demping van zo'n 0,7-0,8%. Uit de metingen bleek dat de werkelijke demping zelfs iets lager ligt, rond de 0,6%, afhankelijk van de locatie.

Afgezien van de lagere demping kwamen de experimentele resultaten goed overeen met de berekeningen. Alle berekende eigenmodi waren terug te zien in de metingen, hoewel de frequenties niet exact overeenkwamen. In werkelijkheid lagen de eigenfrequenties iets hoger dan berekend. Dit verschil is te verklaren door de aangenomen stijfheden in de berekeningen. Zo werd de stijfheid van knooppunten slechts voor enkele specifieke gevallen bepaald. Op locaties met dikkere las-

sen kan de knooppunten stijfheid hoger zijn, wat de hogere gemeten stijfheid kan verklaren. Ook kan bijvoorbeeld de rvs-beplating meehelpen in het verhogen van de stijfheid.

Installatie en verificatie dempers

Na engineering en installatie van de dempers is de constructie opnieuw gemeten om te verifiëren of de demping voldoende was toegenomen. De dempers zijn volgens nauwkeurige specificaties geplaatst en hun werking is gevalideerd via een reeks tests. Deze tests bevestigden dat de dempers effectief bijdragen aan het verhogen van de demping en daarmee aan het verminderen van de amplitude en versnellingen van trillingen, wat de algehele stabiliteit en het comfort ten goede komt. Uit de metingen na installatie bleek dat de totale demping was toegenomen tot bijna 7% voor het meest kritieke dynamische deel van de Tornado: de grote uitkraging.

In *afbeelding 8* is deze toegenomen demping weergegeven. De kleine grafiek binnen de grotere toont de versnelling van de constructie na enkele seconden 'wippen' op de gemeten eigenfrequentie, met geïnstalleerde TMD's. De buitenste grafiek toont de versnelling van hetzelfde deel van de constructie na dezelfde belasting, maar met vergrendelde TMD's. Beide grafieken hebben dezelfde schaal. Hieruit blijkt duidelijk dat de verhoogde demping leidt tot aanzienlijk lagere versnellingen en dat de trillingen snel uitdoven na het stoppen van

de belasting. In *afbeelding 9* zijn de locaties te zien waar uiteindelijk dempers zijn toegepast.

Praktijktest dynamisch gedrag

Tot slot is een praktijktest uitgevoerd met een groep mensen, met vertegenwoordiging vanuit de opdrachtgever, om het dynamisch gedrag van de constructie na installatie van de dempers te valideren. Tijdens deze test is de respons van de constructie gemonitord terwijl de groep elke mogelijke beweging mocht maken, maar ook gevraagd werd synchroon te bewegen op de natuurlijke frequentie, begeleid door een metronoom. Dit bood een realistische beoordeling van het dynamisch gedrag onder normale gebruiksomstandigheden. De resultaten bevestigden dat het dynamisch gedrag van de constructie voldeed aan de verwachtingen, en dat een veilige en comfortabele gebruikerservaring gewaarborgd is.

Conclusie

De Tornado, als centrale blikvanger van het museum, stelt unieke eisen aan ontwerp en engineering, zeker ook op het gebied van dynamisch gedrag. Door een combinatie van geavanceerde rekenmodellen, praktijkgerichte simulaties en uitgebreide metingen is het gelukt om het dynamisch gedrag van de constructie inzichtelijk te maken en beheersbaar te houden. De inzet van een vluchtsimulator gaf de opdrachtgever een tastbare ervaring van de te verwachten versnellingen, wat leidde tot goed onderbouwde keuzes in het ontwerptraject.

De toepassing van Tuned Mass Dampers blijkt een effectieve en efficiënte oplossing om het trillingsgedrag te verbeteren zonder onnodige materiaaltoename. De metingen na installatie bevestigden dat de demping aanzienlijk is verbeterd, met name op de meest kritieke locaties, zoals de grote uitkraging. Tot slot bevestigde een praktijktest met gebruikers dat het dynamisch gedrag van de constructie voldoet aan de eisen van comfort en veiligheid. Het project illustreert hoe samenwerking tussen architect, constructeur, opdrachtgever en leveranciers kan leiden tot een innovatieve en toekomstbestendige oplossing waarbij de eigenschappen van het materiaal staal optimaal zijn benut. •

TORNADO, FENIX II, ROTTERDAM (5): ROESTVAST STALEN BEKLEDING

Dit artikel is deels gebaseerd op de paper 'Fenix: Shaping a Tornado Structure in a Structural, Integral Approach', K.C. Terwel (e.a.), IABSE Congress Ghent 2025, The Essence of Structural Engineering for Society, Congress Proceedings, Eds. D. Leonetti, H.H. Snijder, B. De Pauw en S. van Alphen, IABSE, Zurich 2025.



Puzzelen, passen, polijsten

Het kenmerkende, spiegelende uiterlijk dankt de Tornado aan de 297 gepolijste roestvast stalen panelen waarmee het is bekleed. Het spaceframe, waaraan de huid is opgehangen, en de panelen zelf zijn integraal ontworpen voor een coherente structuur. En om bouwtoleranties, esthetiek en constructieve eisen op elkaar af te stemmen.

ir. A. Herder

Arnoud Herder is projectmanager bij CIG Architecture in Groningen.

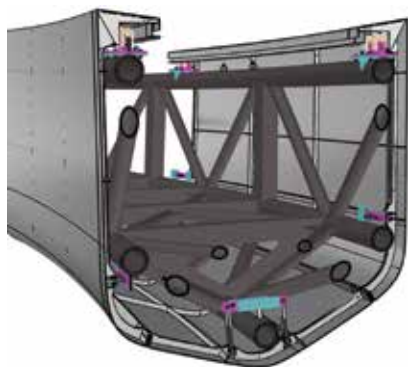
Voor het ontwikkelen van een ruimtelijk model van de Tornado dat voldeed aan zowel de architectonische en constructieve als alle functionele eisen, moest een fors aantal parameters met driedimensionale afhankelijkheden worden samengebracht. Het beheersbaar ontwerpen van een systeem met een dergelijke geometrische complexiteit (incl. alle interfaces met het gebouw) vereiste een uitgeknipte parametrische opzet. Op deze manier kon met veel flexibiliteit en

nauwkeurigheid worden gewerkt aan zowel de draagconstructie als de architectonische huid. Hiernaast moesten in dit model functionele eisen, zoals beloopbaarheid van de trap, borstweringshoogte, minimale hellingen voor hemelwaterafvoer, breedte van de trap, ruimtereserveringen voor systeemhoogtes van de roestvast stalen panelen en houten trapbekleding en de bouwtoleranties, op alle onderdelen worden verwerkt en gecontroleerd. In een vroeg stadium is een *geometry*

method statement opgesteld, waarin al deze eisen zijn gebundeld en hun onderlinge afhankelijkheden in kaart zijn gebracht. Ook is hierin uiteengezet hoe de geometrie van de huid en het spaceframe is opgebouwd.

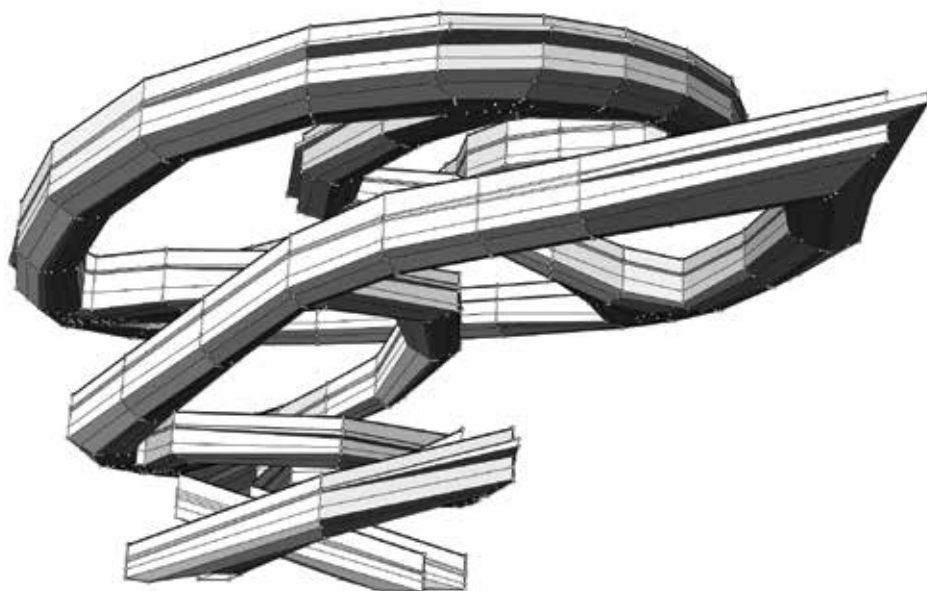
Ruimtelijk model

De basisvorm van de Tornado is, zoals gezegd, door de architect gedefinieerd als SubD (Subdivision Surface Geometry). Deze manier van modelleren, waarbij een grove polygoonvorm wordt gedefinieerd die vervolgens door de software wordt opgedeeld in kleinere vlakken tot een gladde gedetailleerde vorm, maakte het mogelijk om het manipuleren van de hoofdvorm te integreren in het ontwerpproces van het spaceframe. De hartlijnen van de bovenste twee buizen van dit frame hebben in het parametrische model een directe relatie tot de buitenranden

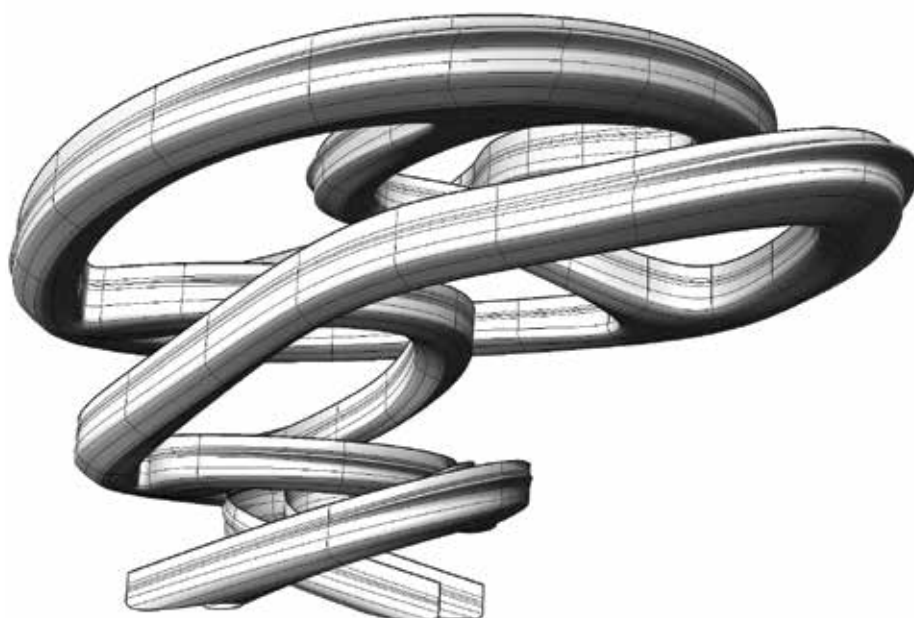


Doorsnede met ophanging panelen aan spaceframe.

van de huid. Voor de onderste drie buizen ligt deze relatie complexer, doordat naast een minimale afstand tot de huid er ook een directe interface is met de onderzijde van de trapconstructie. Aangezien de trap een veel grilliger verloop heeft door de verschillende tussenborden, tredeafmetingen en cetera, moest een manier worden gevonden waarop de hartlijnen voor de buizen zo vloeiend mogelijk konden worden gemodelleerd, met toch overal voldoende constructieve hoogte en afstand tot de trap. Het opstellen van een effectieve parametrische afhankelijkheid tussen architectonische vorm en hartlijn bleek hier lastig. Ook het handmatig manipuleren van een hartlijn in het 3D-model was moeilijk en foutgevoelig. De oplossing voor dit probleem is gevonden in het maken van een 2D-uitslag van de langsdoorsnede door de gehele Tornado (die door de dubbele helixvorm grotendeels bestaat uit een doorlopende vorm). In deze langsdoorsnede is ook een vijftigtal dwarsdoorsneden weergegeven, waardoor op een nauwkeurige manier de gehele Tornado in 2D kon worden getoond. Daarnaast werd het hierdoor mogelijk de spaceframe-hartlijnen te definiëren en terug te brengen naar het 3D-model. Door deze aanpak konden met controle op de ruimte-reserveringen, alle parameters middels een iteratief proces worden geconvergeerd naar een model waarin aan alle eisen werd voldaan. Het resultaat van deze ontwerpfase was een ruimtelijk model, waarin de architectonische vorm en draagstructuur in hoofdlijnen was verwerkt en ruimte-reserveringen waren meegenomen voor de afwerking. Van zowel de geometrie van de huid als de hartlijnen en



Maya polygon-model.



Rhino-model na Catmull-Clark onderverdeling.



Totaaloverzicht staalconstructie en roestvast stalen huid met rechts de grootste uitkraging.



Voormontage van verstijvers op een side skirt (uitstulping).



In speciale mallen worden de segmenten afgemonteerd.



Mal voor 3D-plaatvormen, huid, verstijvers, samenstel.

Naden huidplaten worden volledig afgelast...



...de rest wordt zo veel mogelijk gestifflast, in plaats van hoeklassen, om thermische vervormingen te beperken.

ruwe configuratie van het spaceframe is na deze fase niet significant meer afgeweken. De vakverdeling van het spaceframe is voornamelijk gebaseerd op de locaties van de ondersteuning, die moesten samenvallen met een spaceframe-knoop. Het aantal vlakken tussen twee ondersteuning is bepaald met regelgeving over de toegestane hoeken van de diagonalen met de hoofdbuizen en verticalen. Ten slotte is het resulterende spaceframe-ontwerp als lijnmodel geëxporteerd naar SCIA voor de hoofdconstructeur en naar Tekla voor de staalbouwer.

Interface huid en draagconstructie

Het hiervoor omschreven model is als uitgangspunt gebruikt voor het indelen van de huid in panelen. Bij het opzetten van de paneelindeling waren, naast architectonische

afwegingen, de maximale afmetingen voor transport en het ritme van het spaceframe leidend. Dit laatste doordat de ophangpunten geplaatst zijn op de vijf hoofdbuizen van het spaceframe, wat alleen mogelijk is op plekken waar geen knooppunten, diagonalen of andere dragende elementen het plaatsen van ophangvoorzieningen onmogelijk maken. De architect had een belangrijke rol in het bewaken van de esthetische uitgangspunten, zowel bij het aanpassen van de huid als bij het definiëren van de paneelnaden. Met de definitieve huid, zodanig verdeeld in transportabele panelen dat ze konden worden opgelegd op voorzieningen op het spaceframe, kon voor CIG het ontwerpen van de panelen zelf beginnen. Voor het bepalen van de systeemhoogte was in een eerder stadium al eens een concept voor de

constructieve opzet gemaakt. De panelen zijn ontworpen als verstijfde plaatconstructies, waarbij is uitgegaan van een huiddikte van 6 mm met verstijvers van minimaal 60 mm hoog en een variabele dikte. De dwarsdoorsnede van de Tornado is overal opgebouwd uit drie panelen: een onderpaneel en twee zijpanelen. Deze zijn onderling verbonden met bouten en functioneren als één constructief geheel. In langsrichting zijn de sets niet met elkaar verbonden om thermische beweging mogelijk te maken. Ook blijft hierdoor het geheel flexibel en tolerant voor vervormingen van de draagconstructie.

Constructief ontwerp en optimalisatie

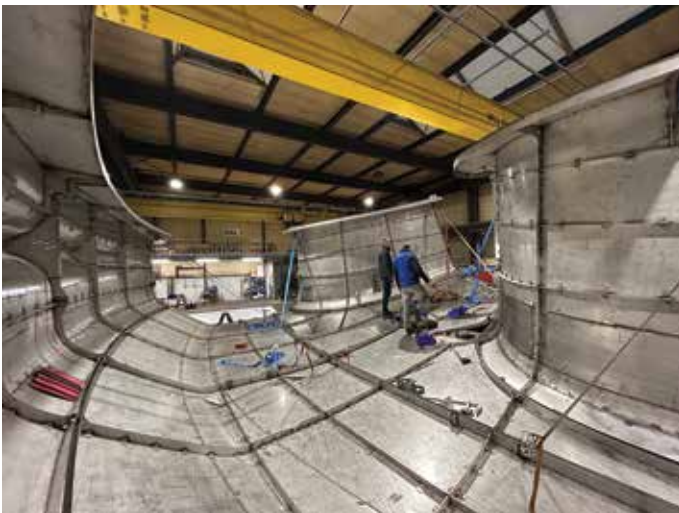
Voor de constructieve analyse is initieel gebruikgemaakt van Karamba3D, een FEA-plugin voor Grasshopper. Hiermee zijn



De platen zijn gevormd met persen zoals bij huidplaten voor de scheepsbouw.



Na positionering zijn de platen onderling uitgelijnd. Daarna volgt het binnenwerk.



Dry fit-montage. Gelijktijdige voormontage van panelen in kruising van paden.



Laatste fabricagefase: slijpen en polijsten. Per paneel tot wel 100 uur arbeid.

de maatgevende panelen geïdentificeerd. Deze zijn vervolgens doorgerekend in Ansys om optimale plaatdiktes en verstijvingshoogtes te bepalen. Zo kon een standaarddimensionering worden bepaald, waarmee ongeveer 90% van de panelen constructief voldeed zonder verdere aanpassingen. Voor de resterende 10%, waar nog wel een iteratie nodig was om spanning of vervorming te reduceren, kon door wijzigingen in de profielhoogte (waar mogelijk) of plaatdikte van verstijvers een paneel zodanig worden ontworpen dat aan alle constructieve eisen werd voldaan. Om visuele eenheid te bewaren, is één standaard plaatdikte aangehouden voor zowel de binnen- als buitenpanelen. Wel varieerde

het ontwerp van de verstijvingsconstructie door grote verschillen in belastinggevallen. Om uniformiteit te garanderen is de basisgeometrie voor de constructie- en productiemodellen gegenereerd met dezelfde scripts. Dit proces stelde de ontwerpers in staat om zowel het esthetische als constructieve aspect van elk paneel nauwkeurig te definiëren. Het 'rekenmodellenscript' genereert voor ieder paneel een model zonder plaatdiktes. De panelen zijn in Ansys berekend op basis van *surfaces*, waaraan vervolgens diktes zijn toegekend. Het exporteren, berekenen en presenteren van de resultaten van de modellen is verregaand geautomatiseerd om zo weinig mogelijk tijd te hoeven besteden aan

repetierend werk. Hierdoor werd het mogelijk om iedere paneelset apart te analyseren in Ansys. Er is onder andere gekeken naar vervormingen, spanningsverdelingen, lasverbindingen en oplettingen. Dit resulteerde in een standaarddimensionering waarbij 90% van de panelen voldeed. Extreme situaties konden individueel worden opgelost, zodat niet alle panelen zwaarder hoefden te worden uitgevoerd.

Uitwerking en productievoorbereiding

Na het doorrekenen en goedkeuren van de eerste series panelen, is het voor de rekenmodellen gebruikte script doorontwikkeld voor het genereren van productiemodellen



Hier geen beschermfolie op de panelen, maar een gematteerde afwerking vanwege brandveiligheid.

en productiedata. Ook zijn in deze fase de panelen uitgewerkt in sets van drie, waarbij alle verstijvers, verbindingen en opleggingen in detail zijn uitgewerkt. Ook zijn alle plaatdiktes aangebracht. De huid van een paneel is opgedeeld in verschillende te vervormen huidplaten. De indeling in platen voor 3D-vervorming is sterk afhankelijk van de complexiteit van de vorm (mate van dubbele kromming). Panelen met veel langsbocht en een grote *side skirt* (de naam voor de uitstulpingen aan de zijkant van de Tornado) bestaan soms uit maar liefst twintig individueel gevormde platen. Ook het uitwerken van de vormmallen voor het vervormen van de ongeveer 2.500 3D-huidplaten is geautomatiseerd.

Tot slot is alle productie-informatie (snijfiles voor alle rvs-onderdelen, vormmallen, onderdelenlijsten, assemblagetekeningen, etc.) uitgewerkt. De gedetailleerde 3D-modellen van de panelen dienden als basis voor het opzetten van de bouwmallen.

Productie

De fabricage van de panelen lag in handen van CIG, de montage deed CSM. Elk van de 297 panelen bestaat uit meerdere dubbelgekromde, gevormde platen die zijn samengesteld op een unieke bouwmal. Deze bestaat uit een stalen tafel met verstelbare poten, waarop een CNC-gesneden contramal wordt gemonteerd. De huidplaten worden hierop

precies volgens het 3D-model gepositioneerd. De platen zijn gevormd met persen waarmee ook huidplaten worden vervormd voor de scheepsbouw. Een belangrijk aandachtspunt was om de platen zo te vervormen dat afdrukken, krassen en andere oneffenheden in het materiaal, die kunnen ontstaan tijdens het vervormen, tot een minimum worden beperkt. Elke oneffenheid zal na het polijsten sterk worden uitvergroot door het spiegelende oppervlak. Na het positioneren van de gevormde platen zijn ze onderling uitgelijnd. Hierna kon het binnenwerk, bestaande uit verstijvers en oplegpunten, worden toegevoegd. Nadat het gehele paneel op de bouwmal was



Mock-up van zeven panelen in Hamont-Achel...



...voor validatie fabricageproces, inclusief onder andere lasvolgorde en toleranties.



Transporteerbare segmenten.



Initiële constructieve analyse met Karamba3D, een FEA-plugin voor Grasshopper.

geassembleerd, kon het worden afgelast. Om vervorming door lassen te beperken, is voor de verbinding van de verstijvers aan de huid veelvuldig gebruik gemaakt van stiflassen in plaats van hoeklassen. De positie van iedere stiflas is meegenomen in de constructieve rekenmodellen. De verstijvers op de randen van de panelen zijn wel volledig gelast. Dit proces is uitgebreid getest in een full scale mock-up met zeven panelen. Deze testopstelling bood de mogelijkheid om het volledige fabricageproces te valideren, inclusief lasvolgorde, toleranties, positionering en vervorming. Zoals gezegd is een belangrijk aspect in het fabricageproces het minimaliseren van thermische vervorming ontstaan tijdens het lassen. Lasvolgordes zijn zodanig geoptimaliseerd dat spanningen zich gecontroleerd konden verspreiden. Ook de keuze van materiaal, lasdraad en nabehandeling speelden hierin een rol. De kwaliteit van ieder paneel werd gerapporteerd op basis van een visuele inspectie, geometrische controle en een dry

fit-montage per set van drie panelen. Bij de kruispunten van de Tornado (de punten waar twee looproutes samenkomen) zijn tot twaalf panelen gelijktijdig gepast om continuïteit in de vorm en aansluiting te borgen.

Slijpen en polijsten

Na het afronden van de kwaliteitscontrole van een paneel volgden meerdere oppervlaktebehandelingen. De panelen zijn eerst gebeitst en gepassiveerd om lasverkleuringen en verontreinigingen te verwijderen en corrosiebestendigheid te verhogen. Vervolgens begon de laatste, en één van de meest arbeidsintensieve, fases van het fabricageproces: het slijpen en polijsten.

Het doel was om panelen te fabriceren met een uniform spiegelende huid en zo weinig mogelijk visuele vervormingen, verkleuringen of lasaftekeningen. Per paneel kon dit tot wel 100 uur slijp- en polijstwerk vereisen. De panelen zijn afgewerkt met een mirror 6-finish. Dit betekent dat de panelen spiegelend

zijn afgewerkt, maar dat er, afhankelijk van de lichtinval, nog wel een lichte kras te zien is als gevolg van de polijstmethode. Bij de buitenpanelen is in bepaalde zones gekozen voor een matte afwerking om het gevaar op hitteconcentratie door lenswerking weg te nemen. De panelen zijn na voltooiing ter goedkeuring voorgelegd aan de opdrachtgever en vervolgens vrijgegeven voor transport en montage.

Logistiek en montage

De gepolijste panelen zijn bevestigd op een transportframe en op afroep van de opslaglocatie naar de bouwplaats vervoerd. Daar volgde de montage op de al geplaatste delen van de draagconstructie. Deze montage vereiste precisie: elke paneel heeft een specifieke positie en oriëntatie.

Nooddeur

Voor de vluchtroute bovendaks was het noodzakelijk een nooddeur te voorzien in de



Luifel is voorgemonteerd op een kadeflocatie op Heiplaat en vanaf ponton ingehesen door Matador 3.

Tornado. De zichtbaarheid daarvan diende tot een minimum te worden beperkt. CIG ontwikkelde een deur die is geïntegreerd in een paneel, waarvan het middensegment als een vliegtuigdeur kan worden geopend. De lagers zijn zo geplaatst dat de rotatie-as precies samenvalt met de hartlijn van de onderste hoofdbuis aan de zijkant van het spaceframe.

De locatie is zodanig gekozen dat het mogelijk was de bovenste hoofdbuis van het spaceframe lokaal te onderbreken.

De deur is zo ontworpen dat deze bij brandalarm automatisch opent. Aan de binnenzijde heeft hij een zigzag-vorm, die in open toestand een beloopbare trap wordt.

Een gesmoorde hydraulische cilinder zorgt ervoor dat de deur gecontroleerd opent en nadien weer kan worden gesloten met een handpomp die is weggewerkt in de zijkant van de Tornado. Om de tredhoogte, -oriëntatie, rotatie-as, et cetera allemaal precies goed te laten uitkomen, zijn de hartlijnen van

het spaceframe, de vorm van de huid en de breedte van het bordes bij de nooddeur zo uitgelijnd dat het geheel kan functioneren.

Monocoque luifel

Anders dan bij de rest van de Tornado is de luifel boven het platform uitgevoerd als een naadloos geheel. Door de dubbele huid-constructie (dak en plafond werken constructief samen) was er naast de liftkern geen extra staal nodig om de luifel te ondersteunen en was het eenvoudig om hem waterdicht uit te voeren. Door de oplegging op de liftkern in het midden van de luifel konden toleranties en thermische uitzetting probleemloos worden opgenomen in het ontwerp. Op deze manier werd ook de installatie eenvoudiger. De luifel van ongeveer 17x12 m is in zijn geheel gebouwd en gepolijst in Groningen. Een speciaal frame is ontworpen om de constructie in zijn geheel te kunnen draaien, zodat het slijpen en polijsten van het plafond niet bovenhands hoefde te worden uitge-

voerd. Nadat de luifel volledig was afgewerkt, is hij op een ponton via binnenwater naar de bouwplaats getransporteerd. De cilindrische bekleding (mantel) rond de liftschacht is in Rotterdam aan de luifel gebouwt.

De cilinder en mantel zijn vervolgens als een geheel vanaf het water over de liftschacht gehesen en eraan vast gemonteerd. Als laatste is het (demontabele) dak van de liftschacht geïnstalleerd.

Parametrisch en ambachtelijk

De productie van de gepolijste panelen voor de Tornado was voor CIG grensverleggend, zowel wat betreft het ontwerpproces als de uitvoering. De ervaring in de scheepsbouw, het werken met dubbelgekromde vormen en het vermogen om digitale modellen te vertalen naar maakbare componenten waren essentieel voor het welslagen van het project. De Tornado toont wat mogelijk is wanneer parametrisch ontwerpen en ambachtelijk vakmanschap elkaar ontmoeten. •



Elementair samenspel

Een gecompliceerde vorm met een glad gepolijst, roestvast stalen oppervlak als de Tornado vraagt om precisie, vakmanschap en controle. Zowel in productie als in montage. Een meteorologische tornado ontstaat ‘tijdens een complex samenspel van elementen die precies goed moeten vallen’. Dat geldt hier ook.

ir. A. Vermeeren

Andreas Vermeeren is projectmanager bij CSM Steelstructures in Hamont-Achel (B).

‘Een *shiny* blauwe achtbaan, is dat niets voor jullie?’ Zo begon het verhaal van de Tornado eind 2019. Een vaste klant en grote Nederlandse aannemer contacteerde ons om samen een aanbieding te maken voor een uniek project. Het was onmiddellijk duidelijk dat dit een *once in a lifetime*-project zou worden en na enkele sparringsessies zaten we samen aan tafel in het bouwteam.

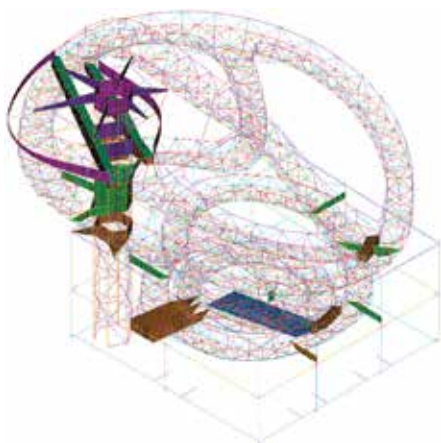
Bouwteam

In dit bouwteam kwamen de constructieve opgaven al snel naar boven. De goede verstandhouding tussen de verschillende bouwpartners en het benutten van elkaars sterktes leidden tot een intensieve samenwerking, waarbij er in een iteratief proces een constructief ontwerp tot stand kwam. Gedurende dit proces hield de staalbouwer met name de maakbaarheid in de gaten, wat bemoeilijkt werd door de complexe vorm en het samenkomen van verschillende disciplines.

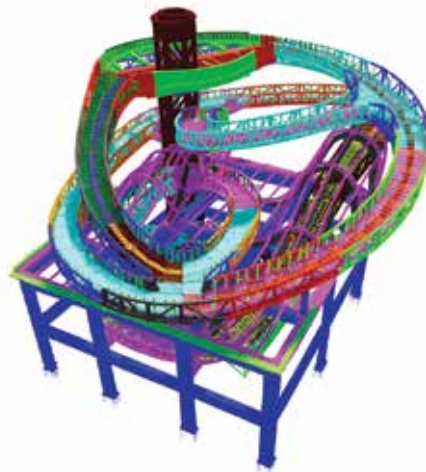
Deze focus op maakbaarheid had enerzijds te maken met de keuzes van profieltypes, het samenstellen van typische knopen en het opstellen van een aantal logische spelregels om het spaceframe samen te stellen. Anderzijds zijn een aantal zones in het spaceframe zodanig uitgenut dat het niet langer opportuun was om deze als spaceframe uit te voeren. In plaats van een open structuur is hier een constructie uit staalplaat uitgewerkt. Bovendien was er uitzonderlijke aandacht nodig voor de bouwkundige en constructieve ontkoppelingen, vanwege de combinatie van een oude, betonnen loods en een nieuwe, stalen structuur (lobbybox) enerzijds en de Tornado en het glazen dak anderzijds. Dit resulteerde in een aantal complexe bouwkundige detailleringen en aandacht voor zorgvuldige uitvoering ervan. De taak was uiteindelijk om dit constructief ontwerp verder te vertalen naar een uitvoerbaar en op de bouwplaats realiseerbaar ontwerp.

Detailengineering

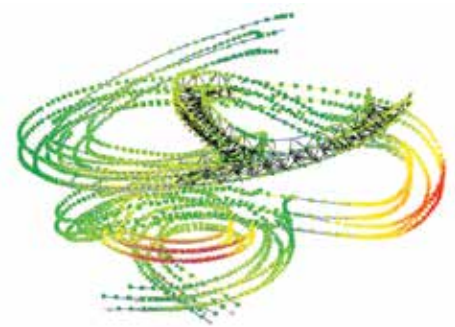
Vanwege de geometrie en specifieke eisen van robuustheid is besloten om het volledige Scia Engineer-model via een XML-export om te zetten naar Ansys. Vervolgens zijn verschillende verfijnde 2D- en 3D-plaatmodellen geïntegreerd in dit globale lijnmodel. Deze integratie maakte het mogelijk om de impact op de detaillering te beoordelen wanneer verschillende constructieve elementen worden weggelaten (tweede draagweg), om een beter beeld te krijgen van de invloed op vervormingen door de stijfheid van verschillende buis-buis verbindingen en om gedetailleerde controles van lassen uit te voeren. De koppeling tussen een staafelement en plaafelementen wordt binnen Ansys gemaakt via ‘constraint equations’ (CE’s). Het materiaalmodel maakt gebruik van elastisch-plastisch gedrag. Voor dit project is overeengekomen dat lokale plastische pieken tot maximaal 2,5% zijn toegestaan in de basis-UGT en tot 5% voor de robuustheidsanalyses. De detaillering is gebaseerd op het basislijnmodel, waarin vervolgens bepaalde optimalisaties zijn toegepast met het oog op maakbaarheid. Zo is er bijvoorbeeld voor gekozen om bepaalde staven uit het systeem te verwijderen zodat er geen overlapping



Ansys rekenmodel (EEM).



Geheel 3D-tekenmodel met alle stalen onderdelen.



Rhino-Grasshopper model met overzicht (3D-) zegen. Groen: weinig, rood: veel.

ontstaat. De knooppunten zijn gecontroleerd op dimensionering volgens de eisen van de gemeente:

- bij 120% van de maximale inwendige krachten voortkomend uit de UGT-basisberekening;
- bij 100% van de maximale inwendige krachten voortkomend uit de berekening van de tweede draagweg;
- bij 130% van de maximale inwendige krachten voortkomend uit de UGT-basisberekening voor alle sleutelcomponenten zoals bepaald door de constructeur in hun robuustheidsanalyse (lobbybox, ruimtetraframe-ondersteuning);
- bij 144% van de maximale inwendige krachten voortkomend uit de UGT-basisberekening voor de staven die normatief zijn voor dynamica (voor deze staven geldt een extra dynamische factor van 1,2).

Er is veel aandacht besteed aan het beperken van het risico op lamellaire scheurvorming tijdens de fabricage van zowel platen als buiswanden. Waar nodig werd hiervoor de Z-kwaliteit bepaald volgens de parameters uit NEN-EN 1993-1-10 of zijn voorzorgsmaatregelen genomen, zoals voorverwarming.

Productiemodel

De staalconstructie van de wenteltrap bestaat uit een combinatie van plaatwerk, buizen en kokers. Het volledige spaceframe bevat maar liefst 2.100 m³ gekromde buizen. Het glasdak bestaat ook uit gekromde buizen, met wanddiktes van 16 en 20 mm. Voor de liftkern hebben de hoofdkolommen een diameter van 508 mm, en bij het platform zijn er plaatdiktes tot 100 mm gebruikt. Door de vele krommingen in de constructie, de hoge eisen op esthetisch en constructief

vlak en het samenkomen van verschillende disciplines in één staalstructuur is de complexiteit van het project groot. De combinatie van Grasshopper-Tekla was cruciaal om het model op te bouwen, maar ook om het haalbaar te maken voor productie. Met Grasshopper is er daarom ook een algoritme ontwikkeld om een 3D-zeeg te induceren zodat de uiteindelijke vervormingen op de werf geminimaliseerd konden worden. Ook eventuele afwijkingen na het monteren werden aan de hand van inmetingen in Grasshopper gecontroleerd.

Tijdens het voortraject is binnen het bouwteam actief gestreefd naar een constructief ontwerp dat zo dicht mogelijk aansloot bij de oorspronkelijke architectonische visie. Dit gold zowel voor de opbouw van de huidpanelen als voor het constructief ontwerp van de Tornado. Deze aanpak resulteerde in een



Productieopstelling (of -aanleg). Alle transportsecties (hier zes) zijn in een vormontage geassembleerd voor zuivere passing op de bouwplaats. Dit betreft het deel (innerspine) met de grootste uitkraging. Rechtsboven komt de liftschacht. Links is de uitmonding bovendaks.



Secties worden na de productieaanleg ontkoppeld en omgekeerd voor bovenhands aflassen.

centerlijnenmodel waarvan de krommingen niet gebaseerd zijn op standaard cirkelbogen, maar op vrije vormen. Om deze geometrieën om te zetten naar een produceerbaar model, is een conversiestap toegepast waarbij de willekeurige krommen zijn vertaald naar segmenten met een vaste straal. Hierdoor konden de buizen effectief gewalst worden binnen de technische beperkingen van het productieproces.

De combinatie van driedimensionale zeeg en het omzetten naar walsbare boogstralen leidde tot een zekere afwijking tussen het theoretische ontwerpmodel en het uiteindelijke productiemodel. Deze afwijking is zorgvuldig geanalyseerd en gecombineerd met productie- en montagetoleranties om de noodzakelijke vrije ruimte ten opzichte van de huidpanelen te waarborgen en clashes te voorkomen.

Het ontwerp van de Tornado brengt meerdere disciplines samen, waarbij de gepolijste roestvast stalen huidpanelen een prominente rol spelen. Deze panelen zijn opgehangen aan het spaceframe en vereisen bevestigingspunten die niet alleen structureel robuust zijn, maar ook voldoende flexibiliteit bieden om toleranties in het frame en de panelen op te vangen. De engineering van deze bevestigingspunten kwam tot stand in nauwe samenwerking met CIG, waarbij esthetiek, functionaliteit en montagevriendelijkheid centraal stonden.



Lobbybox (wit) en eerste Tornado-secties op tijdelijke pendelkolommen.

Daarnaast is in de Tornado een geïntegreerd waterafvoersysteem voorzien om regenwater gecontroleerd af te voeren. In samenwerking met Svasek en Bosman is een oplossing ontwikkeld waarbij het water onder de loopvloer wordt opgevangen in stalen opvangbakken. Deze bakken lozen het water via standpijpen die strategisch gepositioneerd zijn ter hoogte van de ondersteuningskolommen van de Tor-

nado. Zowel de bakken als de leidingen zijn mechanisch gekoppeld aan het spaceframe. De engineering van het waterafvoersysteem liep parallel met de ontwikkeling van de ondersteuningsstructuur voor de houten loopvloeren. Hiervoor was de samenwerking met Woodwave van cruciaal belang. De integratie van deze verschillende disciplines binnen de beperkte beschikbare ruimte



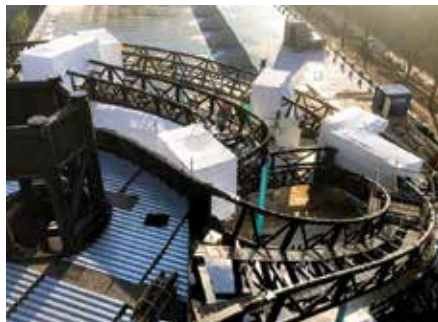
Spaceframesectie bovendaks. Alle secties worden doorgelast met een 'kroon' in de onderbuis die schuift in het aansluitend profiel van de volgende. Na montage worden verbindingen gebout en tijdelijk ondersteund om af te lassen.



Constructie onderdaks is afgelast en afgeschilderd voor start montage roestvast stalen bekleding. Bovenin: werkvloer voor glasdak.



'Fast lane' geheel rvs omhuld. Start houten afwerking.



Aflassen en afschilderen in witte tenten.



Montage panelen onderzijde spaceframe (met o.m. drukkers en takels) dat uitmondt op het dak.



Lobbybox gereed. Rechtsonder: laatste sectie van de slow lane. In de kraan: eerste sectie fast lane (links). Secties zijn ingehesen met een vast punt en twee elektrische takels op afstandsbediening.

van het spaceframe bracht diverse technische opgaven met zich mee. In sommige gevallen was het noodzakelijk om het technische model aan te passen om tot een werkbare en uitvoerbare oplossing te komen.

Productie

Om de impact op de directe omgeving van het bouwproject tot een minimum te beper-

ken, is bewust gekozen om zo veel mogelijk prefab onderdelen naar de bouwplaats te vervoeren. Deze aanpak resulteerde niet alleen in een aanzienlijke reductie van het aantal transportbewegingen, maar was ook een ecologisch verantwoorde keuze. Het volledige spaceframe is daarom opgedeeld in 31 transportsecties. Om een correcte uitlijning van de aansluitende secties te

garanderen, zijn in de productiehal meerdere secties gecombineerd in tijdelijke opstellingen. Deze zijn bewust laag bij de grond opgebouwd om de bereikbaarheid te verbeteren en de samenstelsnelheid te verhogen. Met ondersteunende hulpstructuren is eerst de onderbuis gepositioneerd, waarop vervolgens de geprefabriceerde driehoeksliggers zijn gemonteerd. Deze liggers bevatten uitspa-



Liftkern op vrachttransport....



...daarna per ponton naar Fenix II om in één keer in te hijsen...

ringen voor de integratie van de onderste leuningbuizen. Hierop zijn de kolommen geplaatst, die op hun beurt voorzien zijn van uitsparingen voor de bovenste leuningbuizen. Tot slot zijn de diagonale elementen in de verschillende vlakken aangebracht om de structurele samenhang te verzekeren. De assemblage in de werkplaats gebeurde met een hoge mate van nauwkeurigheid, waarbij gebruik is gemaakt van geavanceerde digitale technieken zoals laserprojectoren, *total stations* en *point cloud*-scans. Extra aandacht ging uit naar de positionering van de bevestigingspunten voor de huidpanelen, vanwege hun visuele en structurele belang. Om de laskwaliteit te garanderen, zijn de secties tijdens de productie zodanig gepositioneerd dat de laszones zo horizontaal en goed toegankelijk mogelijk waren. Reeds

in het ontwerpproces is rekening gehouden met de bereikbaarheid van deze zones, zodat ondanks de complexe geometrie van het spaceframe een efficiënte en kwalitatieve lasuitvoering mogelijk bleef. Aangezien het spaceframe uiteindelijk niet zichtbaar blijft in het eindresultaat en dus moeilijk inspecteerbaar is, is gekozen voor een hoogwaardig conserveringssysteem. Er is een robuust verfsysteem toegepast met laagdiktes tot 800 µm, om een langdurige bescherming tegen corrosie en omgevingsinvloeden te waarborgen.

Lobbybox en liftkern

Door de combinatie van een oude, betonnen loods en een nieuwe, stalen structuur, is er uitzonderlijke aandacht nodig voor de ontkoppelingen. Zo is er een nieuwe, stalen



...op eigen fundament.

tafelconstructie gemaakt, die de Tornado draagt. Deze lobbybox is opgebouwd met een vierdeelconstructie uit samengestelde kokerprofielen.

De zware kokerprofielen zijn geassembleerd en gelast met een laskraan, waarbij de lassen zijn uitgevoerd via het onderpoederlassen-proces. Om een uniforme en nette uitstraling te garanderen, zijn alle componenten op de werf verbonden met werflassen. De impact op de omgeving is tot een minimum beperkt door de montage uit te voeren met een telescopische kraan die binnen in het gebouw was opgesteld.

Naast de lobbybox wordt de Tornado ook ondersteund door de liftkern. Ondanks de afmeting van de liftkoker is ervoor gekozen om deze als één geheel te construeren en via waterwegen te transporteren. Dit had als voordeel dat de impact op de omgeving beperkt is, doordat de bouwtijd verminderd werd en er minder werflassen noodzakelijk waren. Ook droeg het bij aan het in de hand houden van de productietoleranties en de kwaliteitsborging.

In de werkplaats is de liftkoker samengesteld uit drie frames, die met een op maat gemaakte mal zijn uitgelijnd en verbonden. Vervolgens zijn de verbindingstukken tussen de frames geïnstalleerd.

Het bijna 90 ton zware onderdeel is per schip naar de bouwplaats vervoerd. Door capaciteitsbeperkingen aan de kade kon de liftkern niet door een mobiele kraan geplaatst worden. Daarom is het onderdeel geïnstalleerd met een kraan vanaf een ponton.

Montage spaceframe

Elk van de 31 transportsecties is via wegtransport naar de bouwplaats gebracht. Daar zijn de afzonderlijke componenten met een mobiele kraan op hun definitieve positie gehesen. Vanwege de beperkte draagcapaciteit van de historische kade was het noodzakelijk om een uitgebreid schottenplateau aan te brengen, zodat de krachten optimaal konden worden gespreid over de onderliggende structuur.

Het hijsen van elke sectie gebeurde via een drievoudige ophanging, waarbij minimaal

twee elektrische takels werden ingezet. Zo kon de uitlijning van opeenvolgende secties nauwkeurig gecontroleerd worden tijdens het koppelen. Elke sectie is verbonden met het voorgaande element en op ten minste twee punten ondersteund, met als doel een spanningsvrije montageconditie te maken. Bij het ontwerp van de vijzel- en ondersteuningspunten is ernaar gestreefd om deze zo compact mogelijk te houden. Hierdoor konden ze in veel gevallen behouden blijven tijdens de verdere afwerking. Bovendien is er steeds op toegezien dat deze punten op voldoende afstand van de uiteindelijke roestvast stalen panelen gepositioneerd waren, om clashes met de afwerking te voorkomen. De positionering van elke sectie is ingemeten met total station. Hiertoe zijn er verschillende, vooraf bepaalde inmeetlocaties vastgelegd op elke sectie. Deze maakten de monitoring van de verschillende montagefasen gedurende het project mogelijk.

Zodra een reeks secties correct gepositioneerd was, zijn de verbindingsnaden op locatie gelast. Aansluitend diende elke lasvoeg zorgvuldig te worden behandeld en geschilderd om corrosiebescherming te waarborgen. Ter bescherming van de laswerkzaamheden en om hinder voor de omgeving te beperken, is rond elke werfvoeg een tijdelijke tentconstructie geplaatst. Deze voorzorgsmaatregel garandeerde niet alleen de kwaliteit van het lasproces, maar ook een gecontroleerde werkomgeving voor de schilderwerken.

Na het lassen en schilderen van de verschillende transportsecties binnen een specifieke montagefase, kon worden overgegaan tot het gecontroleerd verwijderen van de tijdelijke kolommen onder de staalstructuur. Om ongewenste spanningsopbouw in de constructie te vermijden, is vooraf een gedetailleerde volgorde voor deze demontage vastgelegd.

Glasdak

Ook het glasdak van Fenix II is een indrukwekkend werk met technisch vakmanschap. Het welft zich sierlijk rond de twee trappen van de Tornado, op de plaatsen waar deze naar buiten treden. Het resultaat is een driedimensionaal gekromd dak, opgebouwd uit speciaal gevormde glasplaten die gedragen worden door een nauwkeurig ontworpen bui-



Staalconstructie glasdak met tijdelijke toogconstructie (links) voor correcte maatvoering. Blauwe 'potjes' voor montage glaspanelen.



Eerste fase glasdak (van twee fases).

zenstructuur met gebogen vormen. De ondersteunende staalconstructie bestaat uit buizen met een wanddikte van 16 mm en diameters van respectievelijk 323 en 244 mm. Deze buizen volgen de kromming van de glasconstructie op een vaste afstand, wat enerzijds resulteert in zeer kleine straalwaarden en anderzijds in korte booglengtes. Dit was noodzakelijk om de afwijking tussen de theoretische kromme en het gerealiseerde productiemodel tot een minimum te beperken.

Een belangrijk aandachtspunt in het ontwerp was de dilatatie tussen het glasdak en de Tornado. Het glasdak moest op alle momenten

onafhankelijk blijven van de Tornado-structuur. Dit vereiste bijzonder complexe detaileringen ter hoogte van de steunpunten en de zones waar de Tornado door het glasdak heen treedt.

Om het transport en de montage te optimaliseren is het glasdak opgedeeld in elf afzonderlijke transportsecties. Ondanks deze opdeling is het volledige dak eerst in zijn geheel opgebouwd in de productiehal. Dit stelde het team in staat om de uitlijning van de verschillende secties nauwkeurig te controleren en te garanderen.

De assemblage in de werkplaats gebeurde nauwkeurig, waarbij wederom gebruik is ge-



Foto: IFS Building Systems

Staal-glas constructie

IFS Building Systems ontwierp, leverde en monteerde 255 3D-gebogen dakglaspanelen, cockpitpuien, het glas voor de liftschacht, de gebogen glasbalustrade en stripstalen puien. Parametrische engineering en tolerantiebeheer stonden centraal.

De extreme dubbele kromming in het dak vroeg inventieve engineering om binnen de fabricagemogelijkheden te blijven. De staal-glas deskundigen integreerden productieconstraints – zoals buigradii, paneeldimensies en toleranties – in een parametrisch model. Aanpassingen werden in minuten gecontroleerd op maakbaarheid, wat snelle afstemming met de staalbouwer en glasleverancier mogelijk maakte. Het glas is onzichtbaar mechanisch gevat voor een vlak buitenaanzicht, met uv-bestendige kitvoegen. De minimalistische bevestiging is projectspecifiek en tolerantievriendelijk, met stelmogelijkheden in meerdere richtingen. De cockpitpuien in de dakopeningen bewegen mee met de looppaden, met speciale details voor bewegingen zonder compromis op klimaatverschil.

De cilindrische liftschacht, doorlopend door het dak, is bekleed met warmgebogen glas: binnen, gelaagd veiligheidsglas; buiten, thermisch gebogen isolatieglas met uniforme coating. De in hoogte verlopen de balustrade volgt de dekradius en is versterkt met speciale folie tegen delaminatie. De monumentale stripstalen puien zijn deels EW30-brandwerend.

maakt van geavanceerde meet- en positioneringstechnieken zoals laserprojectoren, total stations en point-cloud-scans. Deze technologieën maakten het mogelijk om de complexe geometrie van het dak exact te realiseren.

Op de gebogen buizenstructuur zijn circa 800 verbindingpunten aangebracht die dienst doen als ondersteuning voor de gekromde glasplaten. Deze connectoren, vervaardigd uit kokerprofielen, moesten met grote precisie en onderlinge consistentie gepositioneerd worden. Dit vereiste een uiterst zorgvuldige aanpak, aangezien de complexe driedimensionale vorm van de buizenstructuur geen uniforme referentiepunten bood. De variërende krommingen en richtingen van de buizen maakten het positioneren van elk apart element tot een opgave. Om de exacte plaatsing van de connectoren te realiseren, is gebruikgemaakt van geavanceerde digitale meet- en uitlijningstechnieken. Deze aanpak was essentieel om ervoor te zorgen dat de glasplaten later zouden aansluiten op de onderliggende structuur, zowel esthetisch als constructief.

Op de bouwplaats zijn de afzonderlijke secties zorgvuldig ingehesen en tijdelijk ondersteund op de onderliggende lobby-box. Dankzij deze tijdelijke ondersteuning konden de lasverbindingen tussen de secties spanningsvrij worden uitgevoerd, wat essentieel was voor de constructieve integriteit en esthetische afwerking van het geheel.

Crashdeck en hoogwerkerplatform

Al vroeg in de ontwerpfase werd duidelijk dat een crashdeck onmisbaar zou zijn voor een veilige en efficiënte uitvoering van de werken. Door de stalen glasdakconstructie strategisch te ontwerpen als dragende structuur voor dit tijdelijke platform, kon aan meerdere functionele vereisten worden voldaan. Enerzijds maakte deze aanpak het mogelijk om gelijktijdig twee bouwstromen te organiseren: boven het glasdak kon men verder werken aan de ruwbouw van de Tornado, terwijl eronder reeds gestart kon worden met de afwerkingsfase. Anderzijds was het crashdeck essentieel om bepaalde zones van de Tornado toegankelijk te maken voor hoogwerkers en spinkranen, die nodig waren voor montage en afwerking op hoogte.

Het crashdeck bestond uit twee delen: één boven op het glasdak en één boven het bestaande betonnen gebouw. Het tweede deel, ook wel het hoogwerkersplatform genoemd, is gerealiseerd door een stalen draagstructuur te laten steunen op de bestaande betonnen kolommen. Aangezien het betondak zelf onvoldoende draagkracht bezit om de belasting van hoogwerkers en spinkranen op te nemen, is ervoor gekozen om de krachten rechtstreeks af te dragen via de kolommen. Deze kolommen zijn bijkomend geschoord op de onderliggende verdiepingvloer, zodat de horizontale krachten konden worden opgenomen door de betonnen vloerplaat als schijfwerking. Op de stalen draagstructuur zijn vervolgens draglineschotten geplaatst om een stabiel werkplatform te creëren.

Het crashdeck op het glasdak is opgebouwd uit relatief zacht ballinghout, aangebracht in twee lagen die kruislings over elkaar zijn gelegd. Deze methode maakte het mogelijk om de driedimensionale vorm van het glasdak nauwkeurig te volgen. Bovendien werd hiermee de montage vereenvoudigd en kon het crashdeck na afloop van de werken op een efficiënte manier worden gedemonteerd. De opbouw van het crashdeck is in een vroeg stadium grondig onderzocht, zowel via constructieve berekeningen als met een groot-schalige proefopstelling. In deze testopstelling is een representatief deel van het glasdak nagebouwd, waarop stalen panelen van 1.200 kg vanaf een hoogte van 15 m werden neergelaten. Deze praktijktest diende niet alleen om de veiligheid van het ontwerp aan te tonen, maar ook om de materiaalkeuze te valideren en te optimaliseren.

Montage huidpanelen

De Tornado wordt gekenmerkt door zijn roestvast stalen jasje. Deze huid is opgebouwd uit 297 unieke panelen die met precisie en oog voor afwerking vervaardigd zijn. Elk paneel is op een speciaal ontworpen transportbok naar de bouwplaats vervoerd. Bij aankomst op locatie is elk paneel onderworpen aan een finale inspectie om eventuele schade vroegtijdig te kunnen rapporteren en op te lossen. Het hijsen van elk afzonderlijk paneel is vooraf zorgvuldig geanalyseerd op basis van

het 3D-model van de constructie. Afhankelijk van het type paneel en de specifieke positie binnen de structuur, is gekozen voor hijswerk met een bouwkraan of een spinkraan. Deze keuze is telkens afgestemd op de bereikbaarheid, het gewicht en de montagevolgorde van het paneel.

Voor de zijpanelen zijn op maat ontworpen hijsogen toegepast, die toelieten om de panelen op twee punten te hijsen, terwijl ze direct in de juiste oriëntatie konden worden gepositioneerd. Aangezien de beschikbare ruimte rond de panelen vaak beperkt was, bleek het gebruik van lange stroppen of standaard evenaars niet altijd mogelijk. Daarom werd een in lengte verstelbare evenaar ontwikkeld, die flexibel kon worden aangepast aan de omstandigheden ter plaatse.

Voor de onderpanelen is een speciaal verstelbaar frame ontworpen waarin de panelen schadevrij konden worden geplaatst. Met een balkendrukker, gemonteerd op een spinkraan, konden de panelen vervolgens gecontroleerd omhoog worden gedrukt tot aan hun bevestigingspunten.

Vanwege de complexe geometrie van de Tornado is de montagevolgorde van de panelen vooraf nauwkeurig bepaald. In sommige gevallen was het noodzakelijk om delingen aan te brengen in de panelen, omdat montage als één geheel rond het spaceframe fysiek onmogelijk was. Deze delingen zijn steeds strategisch geplaatst op locaties met minimale visuele impact, en met grote zorg uitgelijnd om de esthetiek van het geheel te behouden. De bevestigingspunten tussen de panelen en het spaceframe zijn zodanig ontworpen dat ze niet alleen de constructieve krachten konden overbrengen, maar ook een uiterst precieze uitlijning van de panelen onderling mogelijk maakten. Deze uitlijning vereiste een minutieuze afstelling van elke koppeling, zodat de voegbreedtes en overgangen tussen panelen zo uniform mogelijk bleven. Dit proces werd bemoeilijkt door de variërende paneelvormen, bouwtoleranties en verschillen in stijfheid van de materialen.

Zodra een reeks panelen gemonteerd en uitgelijnd was, volgde een gezamenlijke inspectie met de opdrachtgever. Tijdens deze afname is het resultaat beoordeeld en waar nodig zijn correcties doorgevoerd om de



Voormontage uitkijkplatform op dezelfde kadelocatie (Heiplaat) waar de luifel is samengesteld.

uitlijning verder te optimaliseren.

Als laatste stap in het montageproces zijn de lichtkoven onder de leuning van de panelen geïnstalleerd.

Montage vloerondersteuning

De binnenzijde van de Tornado is volledig bekleed met houten planken, die een warme uitstraling geven aan het geheel. Deze bekleding vereist een achterliggende stalen draagstructuur die de houten elementen ondersteunt. Door de wisselende krommingen en hoogteverschillen bestond deze achterconstructie vrijwel uitsluitend uit unieke, op maat gemaakte onderdelen.

Het monteren van deze onderdelen vormde een aanzienlijke opgave. Traditionele overzichtstekeningen bleken ontoereikend vanwege de driedimensionale complexiteit van de vorm. Daarom is er nauwelijks gebruik gemaakt van standaard montageplannen. In plaats daarvan maakten de montageteams intensief gebruik van BIM-modellen op tablets. Door het toepassen van verschillende lagen binnen het model konden de monteurs snel en doelgericht de benodigde informatie visualiseren, wat de nauwkeurigheid en efficiëntie van de montage aanzienlijk verhoogde.

Platform en luifel

Op het hoogste punt van de liftkern komen de verschillende routes van de Tornado samen op een panoramisch platform. De constructie van het platform bestaat uit twee zware hoofdliggers, waaraan aan weerszij-

den uitkragende liggers zijn bevestigd. Deze robuuste staalstructuur is vooraf volledig geassembleerd en gelast op een nabijgelegen kade in Rotterdam.

Na voltooiing is het circa 150 ton zware platform in zijn geheel met een kraan op een ponton over het water vervoerd en op de liftkern geplaatst. Deze werkwijze minimaliseerde de montagetijd op de bouwplaats en garandeerde een hoge mate van precisie bij de plaatsing.

In de laatste fase van het project is boven op het platform een roestvast stalen luifel gemonteerd. Deze monocoque constructie, ontworpen als een elegant sluitstuk van de Tornado, is in twee delen over het water getransporteerd en eveneens op de kade samengesteld. Vervolgens is de luifel met dezelfde kraan op de bouwplaats geïnstalleerd – een symbolische en visuele bekroning van het project.

Synergie

De Tornado is een prachtproject. Niet alleen door zijn gewaagde architectuur die het uiterste van wat mogelijk is in onze industrie opzoekt, maar ook door de samenwerking tussen de verschillende bouwpartners. Het is deze synergie waarbij de sterkte van elke partij maximaal benut wordt, samen met de absolute vaardigheid van elke medewerker, die dit project mogelijk heeft gemaakt. Deze samenwerking komt niet magisch of vanzelf; het is een doelbewuste houding van de bouwheer die dit mogelijk maakt en cultiveert. •

Projectgegevens

Opdracht Droom en Daad, Rotterdam • *Architectuur* MAD Architecture, Beijing (CN) en Rome (IT) • *Bouwkundige uitwerking* EGM architecten, Dordrecht • *Constructief ontwerp* IMd Raadgevende Ingenieurs, Rotterdam met CSM Steelstructures, Hamont-Achel (B) en CIG Architecture, Groningen • *Uitvoering renovatie loods* DURA Vermeer Bouw Heyma, Rotterdam • *Staalconstructie* Tornado CSM Steelstructures, Hamont-Achel (B) • *Roestvast stalen bekleding* Tornado CIG Architecture, Groningen • *Houten bekleding* Tornado Woodwave, Rotterdam • *Glasconstructies* IFS building systems, Waddinxveen • *Tuned Mass Dampers* Gerb • *Waterafvoersysteem* Svasek Hydraulics, Rotterdam • *Installaties* De Bosman Bedrijven, Amersfoort • *Architectuur restauratie* Bureau Polderman, Rotterdam • *Lichtontwerp* Beernielsen lichtontwerpers, Rotterdam • *Bouwfysica en brandadvies* LBP | Sight, Nieuwegein • *Lift* Lakeman Liften, Katwijk aan Zee • *Glasproducent* North Glass, Amsterdam

Technische gegevens

Bruto vloeroppervlak 16.000 m², verspreid over twee etages waarvan 10.509 m² toegankelijk voor publiek; tentoonstellingsruimtes 6.000 m²; plein 2.275 m² • *Hoogte loods* 13,4 m • *Lengte loods* 172 m (excl. Fenix I en Provimi) • *Hoogte gebouw* (incl. Tornado) 30 m • *Hoogte uitkijplatform* 24 m • *Tonnage staalconstructie* 2.500 ton • *Data* start ontwerp 2018, start bouw 2020, opening 15 mei 2025 • *Bouwsom* niet openbaar

