



Momentvaste verbinding voor schoon lijnenspel

Het ontwerp van de 160 m lange Lille Langebro wordt gekenmerkt door een slanke vorm met vloeiende buigingen. Om deze geabstraheerde vorm van 'vleugels' mogelijk te maken, is voor de dubbele draaibrug een Central Moment Connection ontwikkeld, een innovatieve hydraulische momentvaste verbinding, waarmee ook op materiaal is bespaard. Ook is er rol weggelegd voor effecten door temperatuurverschillen: gangbaar modelleren bleek niet toepasbaar. En het vormgeven van driehoeksliggers in de apart gebouwde secties is evenmin eenvoudig.

ing. A. Blom, ing. F. Huininga-van Bohemen en S. Fryer MEng CEng MICE MStructE

Anne Blom is projectmanager en Florine Huininga-van Bohemen is projectengineer, beiden bij Hollandia Infra in Krimpen aan den IJssel. Simon Fryer is technisch directeur bij Buro Happold in Londen.



Twee horizontaal draaiende brugdelen voor een ruime doorgang van het scheepvaartverkeer.

De twee Nederlandse bedrijven Mobilis TBI en Hollandia Infra kregen de opdracht om een dubbele draaibrug te realiseren in het centrum van Kopenhagen. Deze brug met de naam Lille Langebro moet fietsers en voetgangers een verbeterde route bieden tussen het historische centrum van Kopenhagen en de Christianshavn.

De brug, naar ontwerp van het Britse ontwerpteam onder leiding van architectenbureau WilkinsonEyre, heeft twee horizontaal draaiende brugdelen voor een ruime doorgang van het scheepvaartverkeer. Lille Langebro is een geschenk van het filantropische investeringsfonds Realdania aan de stad. De nieuwe brug ligt parallel aan de verkeersbrug Langebro, een belangrijke en veelgebruikte verbinding voor het verkeer tussen stad en haven. Met de Lille Langebro (letterlijk vertaald: Kleine Lange Brug) is een veilige en comfortabele verbinding ontstaan voor voetgangers en fietsers die stad en haven daarmee nog dicht bij elkaar gebracht. Inmiddels is de brug nu ruim een jaar open en telt gemiddeld zo'n 10.000 gebruikers per dag.

Constructie en beweging

De bovenbouw is opgebouwd uit vier stalen brugdelen. De twee buitenste overspanningen zijn vaste bruggen; de twee binnenste overspanningen zijn balancerende draaibruggen. Deze draaiende delen garanderen een horizontale vrije doorvaartbreedte van 35 m. In gesloten toestand heeft de brug een maximale horizontale vaarruimte van 20 m

en een verticale vaarruimte van 5,4 m. De draaiende delen worden aangedreven met een elektromechanisch bewegingswerk. De aandrijfmotoren en de zwenklagers zijn weggewerkt in de holle brugpijlers, waarin ook de besturings- en voedingsinstallatie is geplaatst. Ieder brugdeel is geplaatst op een zwenk-lager met een diameter van 3 m, met een hierop ingebouwde tandkrans, die per brugdeel door een viertal elektromotoren wordt aangedreven.

Wind- en temperatuureffecten zorgen ervoor dat de brug tijdens het bewegen andere vervormingen ondervindt dan in gesloten toestand. Er zijn speciale voorzieningen gemaakt om ervoor te zorgen dat ondanks deze vervormingen de brug altijd weer in de doorlopende vorm terugkomt, namelijk door de staartwielen en de neuswielen. De draaiende brugdelen bewegen niet tegelijk, er zit een lichte vertraging tussen beide, waardoor de bruggen op gecontroleerde wijze in positie gedraaid kunnen worden. De achterzijde van de draaiende delen zijn voorzien van twee staartwielen, die in een vangconstructie lopen aan de voorzijde van de vaste secties. Hiermee wordt de bewegingsvrijheid van de draaidelen verkleind, waardoor de draaibrug zich nog enkel binnen een bepaalde marge in de hoogte kan bewegen. Zowel de staartwielen als de vangconstructies zijn zo ontworpen dat deze bij elke ontwerptemperatuur in elkaar draaien.

Ook bij de middelste overgang, ter hoogte van de doorvaart, is zo'n zelfde principe

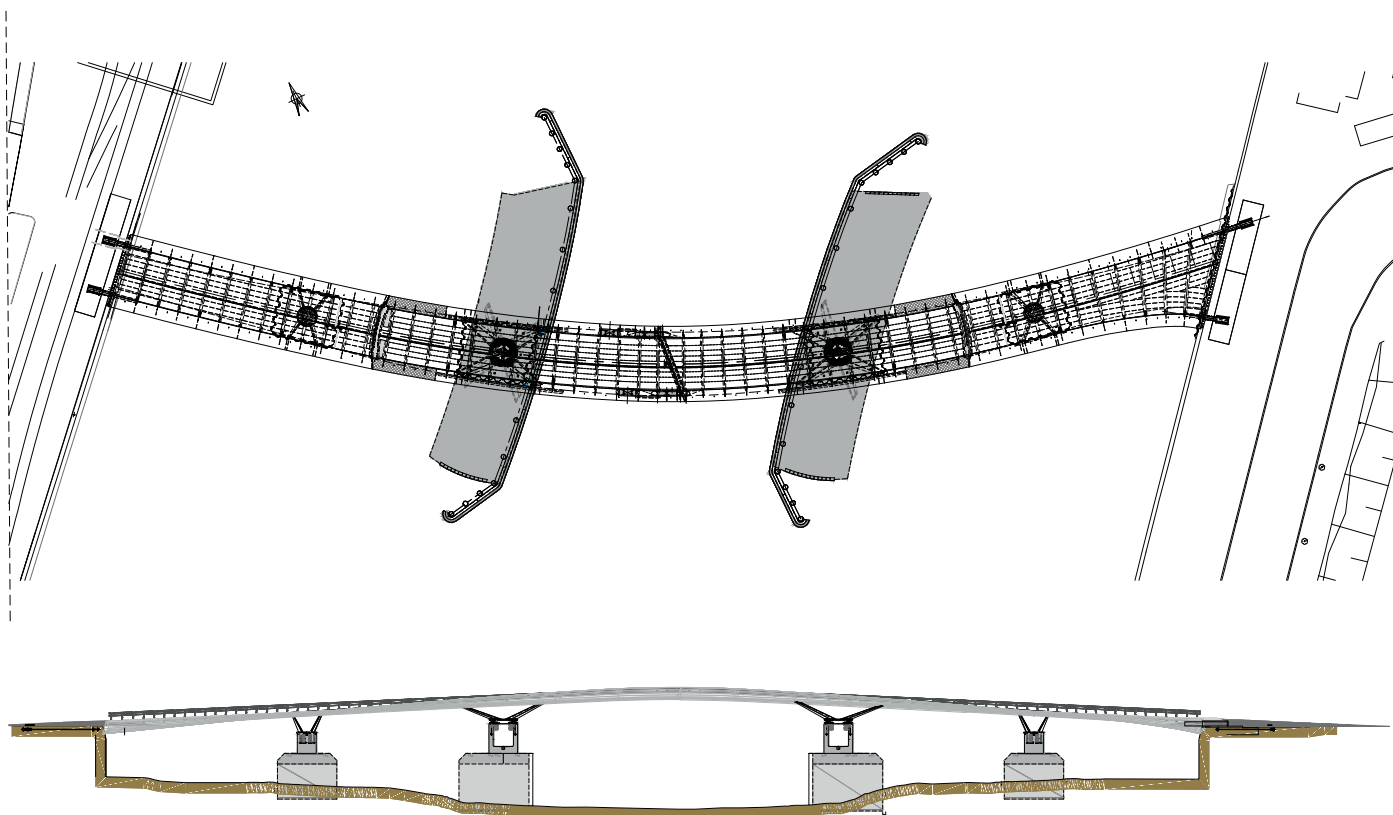
gerealiseerd. De neuswielen van de ene draaibrug draait in de vangconstructie van de al gesloten draaibrug tot aan het rubberen eindblok en stootdemper. Dit gebeurt pas als de staartwielen al ingrijpen, waardoor deze vangconstructie een kleinere marge bevat. De resterende uitlijningsfouten in de middelste voegovergang worden op deze manier dusdanig beperkt dat de cilinders en de *sockets* van de momentconnectie altijd recht tegenover elkaar uitkomen. Hiermee kan een dusdanige verbinding worden gemaakt die de brug haar volle sterkte geeft en ook de driehoeksliggers weer hun iconische, doorlopende lijn krijgen.

Modellen en analyses

De geometrie van de staalconstructie bestaat uit een dubbele kromming van het rijdek en de draaiende driehoeksliggers. Dit maakt dat de brug geen rechte lijnen bevat en de dwarsdoorsnede op elke positie van de brug uniek is. De brug kan hierdoor niet in ieder ontwerppakket gemodelleerd worden. Daarom is specifiek gekozen om de geometrie te ontwerpen in Rhinoceros en de analyses in Midas Civil uit te voeren.

Gedurende de eerste fase van het ontwerp is een lijnmodel gebruikt omdat het een snelle en flexibele oplossing bood om de geometrie weer te geven die waarschijnlijk aan verandering onderhevig zou zijn gedurende de optimalisaties in het ontwerpproces.

Nadat de grote lijnen zijn vastgelegd via het lijnmodel, is een geavanceerder model benodigd om het volledige spanningsverloop



Geen doorsnede is gelijk. De brug heeft een globale kromming in twee richtingen.

in kaart te brengen. Dit is voornamelijk voor de niet-lineaire analyse van belang. Er is een plaatmodel opgezet op basis van het architectenmodel om de geometrie van de gebogen platen vast te leggen. De plaelementen zijn automatisch gegenereerd door Grasshopper. Dit model bood een efficiënte manier van modeleren voor de gevormde driehoeksliggers, de secundaire elementen zijn als balkelementen gemodelleerd. Het 2D-model is gebruikt voor de statische, dynamische en non-lineaire analyses.

Uit ervaring heeft het ontwerpteam extra aandacht besteed aan de goede uitlijning van de verbindingpunten van de brugdelen, omdat draaibruggen over het algemeen gevoelig zijn voor omgevingsfactoren. Het belangrijkste element dat effect heeft op de beweging en uitlijning tussen twee brugdelen, is het temperatuurverschil waardoor de brug in lengterichting uitzet of inkrimpt. Het temperatuurverschil kan ook per plaatveld verschillen, door bijvoorbeeld het effect van de zon, waardoor de brugdelen een andere doorbuiging en draaiing kunnen krijgen. Dit vraagt extra aandacht bij het uitlijnen van de

brugdelen bij elke weersomstandigheid.

De gangbare werkwijze voor het modeleren van de effecten door temperatuurverschillen bleek niet toepasbaar voor deze complexe vorm. Er was een uitgebreide studie vanuit de basisprincipes nodig om de maximale vervormingen te kunnen voorspellen. Dit heeft geleid tot een reeks aan thermische belastingsscenario's om de te verwachten schaduwpatronen in open en gesloten toestand te projecteren.

Alleen op deze manier kon de gehele reeks aan vormen die de brug aan zou kunnen nemen, voorspeld worden. Het zijn de uitgangswaarden geweest om de benodigde vrije ruimte tussen de overgangen en de verbindingen te bepalen, naast de fabricagetoleranties die al in het ontwerp meegenomen dienden te worden.

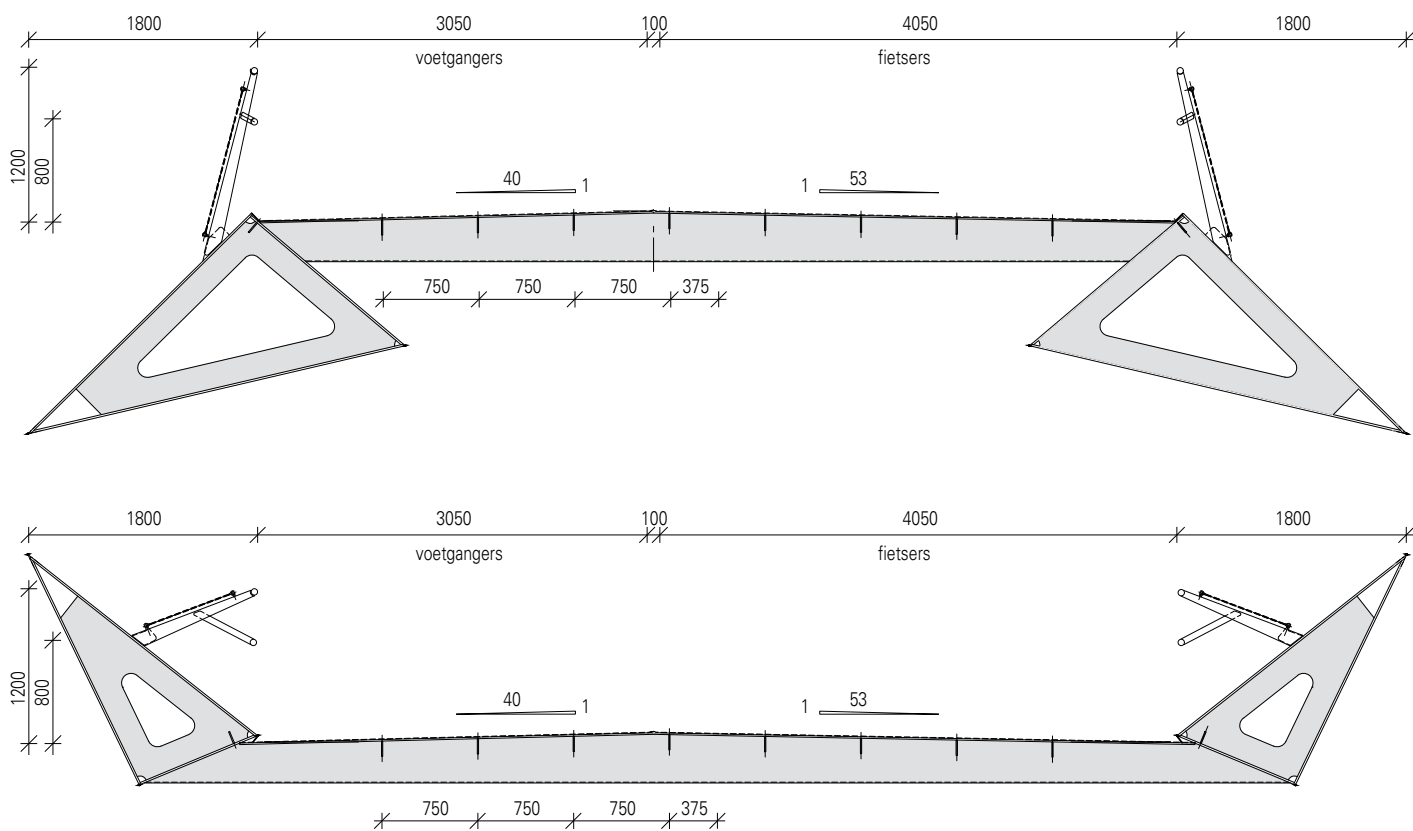
Zonsopgang en -ondergang

Om de schaduwpatronen vast te stellen, is de positie van de zon in het Rhinoceros model gemodelleerd, waardoor bepaald is welke plaatvelden blootgesteld werden aan direct zonlicht. Zowel de open als de dichte positie

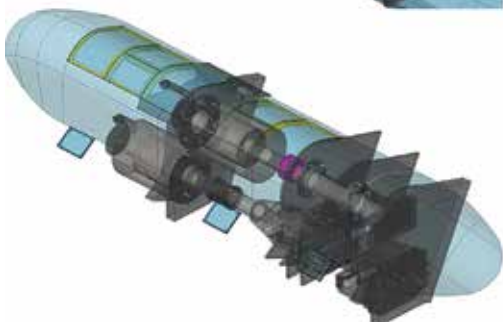
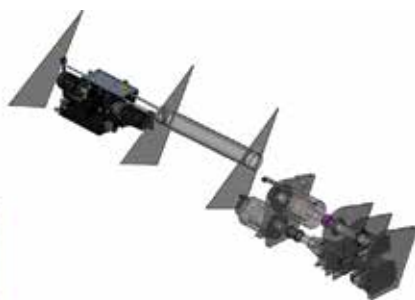
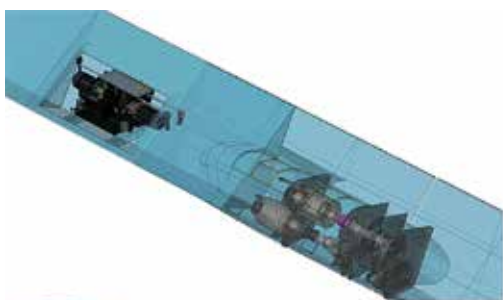
is gemodelleerd voor verschillende tijdstippen van zonsopgang tot -ondergang en voor ieder jaargetijde. Hiermee is de mogelijkheid ingebouwd om de thermische krachten op de specifieke plaatvelden en de werkelijke schaduwpatronen zo accuraat mogelijk na te bootsen. Door de thermische krachten door zonlicht te combineren met de globale uitzetting en krimp, veroorzaakt door omgevingstemperatuur, zijn alle scenario's voor vervorming door omgevingsinvloeden meegenomen in het ontwerp.

Het is een conservatieve manier van modelleren en analyseren, waardoor er veel vertrouwen was in de ontwerptoleranties die meegenomen zijn voor de brug en de onderdelen die de brug terug in vorm moeten brengen bij iedere beweging, namelijk de staartwielen, de neuswielen en de vangconstructies.

Voor de ontwerpers is dit project een nuttige les geweest met betrekking tot het ontwikkelen van numerieke benaderingen bij het ontwerpen van complexe structuren. Deze methode bleek namelijk efficiënter dan het anders zo tijdrovende analysewerk.



Naast de globale krommingen verlopen de driehoeksliggers met hun punt ook over de gehele brug. Bij de landhoofden staat de punten omlaag, terwijl bij de centrale overgang de hoekpunten omhoog staan.



De brug is ondersteboven in de mal gebouwd, zodat driehoeksliggers in vorm gehouden kunnen worden.



Na kantelen van de secties wordt het eindresultaat meer zichtbaar.

Momentvaste verbinding. De trekkende cilinder en de duwende cilinder staan boven elkaar uitgelijnd.



Vormgeving en maatvoering

De 160 m lange draaibrug over de Inner Harbour verbindt het uitzicht over de Vester Voldgade aan het stadhuis naar de haven. En vervolgens over het water naar Christianshavn aan de Langebrogade. Direct aangrenzend bevindt zich het nieuwe BLOX-gebouw, waar het Deense Architectuurcentrum is gevestigd, dat een jaar eerder is opgeleverd. De brug heeft een zelden geëvenaarde complexiteit. Zij is gebogen in alle richtingen, geen stukje is symmetrisch. Zonder moderne digitale technieken was het een onmogelijke opgave geweest deze brug te bouwen.

De constructie is samengesteld uit driehoekige 'vleugels' aan beide zijden van de brug. Deze beginnen benedendeks op de steunpunten en klimmen dan in een sinus-achtige curve geleidelijk op naar de middenoverspanning, alvorens weer neerwaarts af te buigen naar de tegenovergelegen kade. Deze vleugels geven de brug een duidelijke maar subtiele lijn waar licht en schaduw elkaar ontmoeten. Ten slotte biedt het gebogen brugprofiel een verrassend visueel spektakel wanneer de twee draaibare delen opengaan voor het laten passeren van schepen.

Momentvaste verbinding

De slanke constructie is mogelijk gemaakt doordat de koppeling in het midden van de hoofdoverspanning, tussen de twee draaiende delen, niet op een traditioneel scharnierende wijze zijn gekoppeld. Deze twee draaiende delen zijn in gesloten toestand gekoppeld middels een hydraulische momentvaste verbinding. Deze verbinding wordt de Central Moment Connection genoemd en zorgt voor een gunstiger momentverdeling in de hoofdliggers. Ook draagt deze connectie bij aan de stijfheid van de brug.

Bij de middenoverspanning is de constructie hoger dan aan de kades om de vereiste 5,4 m doorvaart-hoogte mogelijk te maken. Samen met de gebogen uitlijning en verhoogde vleugels resulteert dat erin dat het uitzicht op de omgeving geleidelijk wordt onthuld.

De bewegingswerken zijn discreet opgenomen in de pieren waardoor de brug ononderbroken vloeiende lijnen heeft. Opgesplitst in vijf overspanningen, met aanbruggen van 37 m aan weerszijden en twee draaiende delen van in totaal 85 m, heeft de Lille Langebro een minimale vrije breedte van 7 m, opgesplitst in een voetpad van 3 m en een fietspad van 4 m onderverdeeld in twee rijstroken.

De pierarmen hebben een contrasterende donkergrijze kleur om hun visuele impact te minimaliseren en de vloeiende lijnen van de brug verder te versterken. Het leuningwerk is gemaakt van geborsteld roestvast staal, met een lichtgewicht roestvaste mesh-vulling voor transparantie. Het leuningwerk volgt volledig de dubbelgekromde curve van de brugconstructie. De verborgen verlichting in de leuningen verlicht zowel het dek als de vleugels; 's nachts verschijnt de brug als een kronkelend lichtlint tussen de landhoofden.

De bijzondere belijning van de brug, die ontstaat door het 3D-gevormde staalwerk valt met name op zodra de brug opengaat, en de twee centrale brugdelen wegdraaien. Als de brugdelen weer sluiten, grijpen de asymmetrische delen weer in elkaar en vormen ze een krachtige verbinding. Deze robuuste vergrendeling is bereikt door de ontwikkeling en toepassing van een innovatieve momentvaste verbinding. Deze Central Moment Connection maakte tevens het slanke profiel van de brug – en daarmee een aanzienlijke besparing op materiaal – mogelijk.

De Central Moment Connection komt tot stand door twee gekoppelde hydraulische cilinders in beide driehoeksliggers van de brug. De cilinders bevinden zich in de ene draaibrug en de contradelen, de *sockets*, bevinden zich in de andere draaibrug. De bovenste cilinder genereert een drukkracht, terwijl de onderste cilinder een trekkracht genereert. Op het moment dat de brugdelen voor elkaar staan en de drukcilinder in het conische socket drukt, vangt deze zowel de schuifkrachten alsook de verticale uitlijning van de brugdelen op.



Bij sluiten draaien de staartwielen als eerste in de landhoofdbruggen.

De cilinders zijn per ligger hydraulisch gekoppeld op een dusdanige manier dat als de verticale krachten op de brug verhogen, ook de druk in de cilinders verhoogt, zodat de momentconnectie in stand gehouden wordt. Ook wanneer de brug uitzet of krimpt door temperatuurinvloeden, houden de cilinders de momentconnectie vast, door olie van de ene cilinder naar de tegenoverliggende cilinder te pompen. De axiale statische krachten worden hiermee geëlimineerd waardoor de horizontale krachten en resulterende momenten flink worden verlaagd. Daarnaast werkt de Central Moment Connection als een demper voor de wisselende verkeersbelasting, doordat de stroomsnelheid van de hydraulische olie langzamer is dan de wisselingen door verkeersbelasting. Dit verbetert de dynamische prestaties significant: het houdt de verticale versnellingen binnen de gewenste niveaus en zorgt voor extra demping.

Fabricage, passing en montage

De plaatvelden zijn door de staalleverancier geheel in een nieuw fabricagemodel ontwikkeld met daarin de bouwzeeg en de bouwmal meegenomen. De plaatvelden zijn gewalst, gesneden en in vorm gebracht door de staalleverancier voordat deze in de productiehal zijn aangeleverd. Elk plaatdeel kreeg een afzonderlijke mal, bepaald uit het fabricagemodel,

Projectgegevens

Locatie Christians Brygge 27, 1219 København (DK) • Opdracht Realdania By & Byg, Kopenhagen • Architectuur WilkinsonEyre, Londen • Constructief ontwerp Buro Happold, Londen • Uitvoering Bouwcombinatie Mobilis | TBI/Hollandia Infra • Staalconstructie Hollandia Infra, Krimpen a/d IJssel • Fotografie Rasmus Hjortshøj COAST



Het neuswiel, tussen de trekkende en duwende cilinder in, lijnt de draaiende brugdelen op.



Sockets in tegenoverliggende sectie waarmee Moment Connectie afgemaakt kan worden.



Laatste blik op de aandrijving voordat de brugsecties op de pijlers geplaatst worden.

om zo de maatvoering te kunnen controleren. Uiteindelijk kwam het vervormen en persen van de vorm aan op vakmanschap. Nadat de plaatelementen op hun plek in de mal gepositioneerd waren, werden ze met grote omzichtigheid gelast, om te voorkomen dat er alsnog spanningen in de constructie zouden ontstaan. Daarna zijn de verstijvingen erin gelast.

In de mal was dus ook een bouwzeeg opgenomen. Dat is de blijvende kromming die de brug behoudt, vermeerderd met de doorbuigingen die ontstaan door het eigengewicht van de liggers en panelen. In het geval van de Lille Langebro loopt die op tot 10 à 20 cm. De draaipunten zijn vervolgens – met de pierarmen ondersteboven – op de bruggen gelast. De grootste moeilijkheid was het vormgeven van de driehoeksliggers in de apart gebouwde secties. Deze moeilijkheid zat in twee maatgevende elementen: enerzijds de doorhang van elke sectie om de doorlopende zeeg van de brug te maken, anderzijds omdat de vorm van de driehoeken bij de overgangen, geheel op elkaar moeten aansluiten. Bij elk element zijn de uiteinden van de driehoeksliggers eerst gefit en 3D ingemeten waarna enkele aanpassingen nog mogelijk waren om de uiteinden in de theoretische vorm te krijgen. Bij het aansluitende brugdeel is ditzelfde principe gebruikt, echter is de vorm niet alleen met de

theorie vergeleken maar ook met de eindmeting van het reeds geproduceerde aanliggende brugdeel. Bij een te grote doorbuiging, die pas na het kantelen te meten was, zijn de liggers via warmstoken terug op hoogte gebracht. Dit zijn allemaal beheersmaatregelen geweest om de vloeiende lijnen over de voegovergangen door te laten lopen.

Nadat de brugsecties zo ver mogelijk gefabriceerd waren, zijn de bruggen om de dwars-as gekanteld met een drijvende bok.

Na het kantelen van de secties zijn deze geconserveerd en kon het afbouwen beginnen. Het 3D-gevormde rvs leuningwerk, de verlichting en de voegovergangen werden gemonteerd. Met name de draaiende brugdelen zitten vol werktuigbouwkundige hoogstandjes. De Central Moment Connection evenals de andere onderdelen zoals de staartwielen met vangconstructie, de neuswielen en de draaikransen moeten op enkele millimeters nauwkeurig afgesteld zijn, terwijl in tegenstelling de brugconstructies door hun slanke vorm erg flexibel zijn.

Omdat de afstelling tussen de twee draaiende brugdelen veel risico geeft, is hier een volledige proefpassing tussen de twee bewegende delen uitgevoerd op de werf. Zo zijn de brugdelen in de eindvorm gezet en is de momentconnectie geprojecteerd van het ene naar het andere brugdeel. Zowel de draaikransen

waar de bruggen op de lagers zouden komen te staan, als de Central Moment Connection zijn op locatie machinaal bewerkt, waarna alle onderdelen zijn ingebouwd.

Hierna waren de bruggen klaar om naar Denemarken getransporteerd te worden. Ook dit was een opgave om vier relatief flexibele brugdelen zonder enige rechte vorm op een ponton, achter een sleepboot over zee te laten varen. De route verliep via de Noordzee en het Kielerkanaal in Duitsland, naar de Øresund en eindigde in de Zeehaven van Kopenhagen. Daar aangekomen moest de ponton door het stadscentrum varen, onder verschillende bruggen door, om bij zijn uiteindelijke locatie aan te komen. Op de dag na het invaren zijn de eerste brugdelen op hun plaats gelegd. Ze pasten perfect, maar de algehele uitlijn van de brug was nog niet te zien. Met een grote drijvende bok midden in Kopenhagen, werden de dag daarna ook de laatste twee delen geplaatst. Na de montage begon de afwerking van de aansluitende kades en het afstellen, testen van de brug in combinatie met de elektra en hydrauliek, de zogenaamde Site Acceptance Test (SAT) en tot slot ook het in bedrijf stellen van de brug wat zo'n twee maanden in beslag nam. De uitlijning van de brug, werd steeds duidelijker zichtbaar en nadat alle testen waren geslaagd, is de brug op 14 augustus 2019 officieel opgesteld voor publiek. •