

Nelson Mandelabrug de grootste beweegbare composietbrug ter wereld

Brug van plastic en beton

Op 12 februari 2016 is in Alkmaar de nieuwe Nelson Mandelabrug geopend. Bijzonder aan deze beweegbare brug zijn zowel de vormgeving als het materiaalgebruik. Het beweegbare deel is uitgevoerd in vezelversterkt kunststof (VVK, ofwel composiet) en de gewapend betonnen aanbruggen zijn voorzien van gewichtsparende elementen. In ongeveer een jaar tijd is de verbinding ontworpen, gerealiseerd en opengesteld voor gebruik.

De Nelson Mandelabrug zorgt voor een ontsluiting van het Alkmaarse bedrijventerrein Beverkooog over het kanaal Omval-Kolhorn richting de N242. De nieuwe brug is een tafelbrug: een composiet beweegbaar middendeel wordt via balansarmen onder de aanbruggen en met behulp van contragewichten opgeheven. De brugval is 22,5 m lang, waarmee de Nelson Mandelabrug de grootste beweegbare composietbrug ter wereld is. Aanvankelijk had Alkmaar het idee een vaste brug te bouwen met een doorvaarthoogte van 3,70 m. Na protest van bedrijven uit de omgeving is dit aangepast met een beweegbaar deel. Dit resulteerde in een doorvaarthoogte van 4,90 m, wat aansluit op

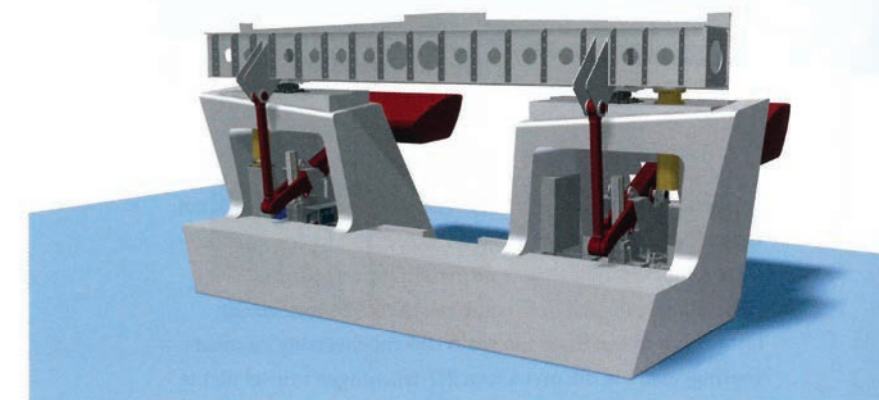
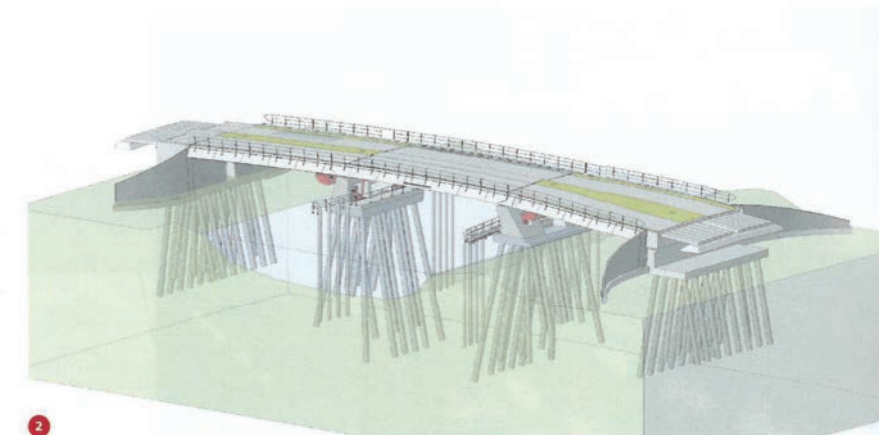
de doorvaarthoogten van de overige bruggen over het kanaal. Deze vrije doorvaarthoogte is voldoende voor de scheepvaart die in CEMT-klasse I valt en in de toekomst mogelijk klasse II wordt.

Opbouw brugconstructie

De brug is gerealiseerd in drie overspanningen waarvan de middelste overspanning een beweegbare brug is. De brugval van composiet (VVK) heeft een lengte van circa 22,5 m en een breedte van 12 m. De twee buitenste overspanningen, de aanbruggen met een lengte van 21 m, zijn geheel traditioneel

ing. Martin de Graaf
DIMCO B.V.

- 1 Nelson Mandelabrug met beweegbaar deel van composiet
- 2 3D-CAD-model Nelson Mandelabrug
bron: SBE
- 3 Bewegingswerk geïntegreerd in de pijlers
bron: Demako



vervaardigd van in situ gestort gewapend beton. De twee aanbruggen voeren over de dijken, aan beide zijden van het kanaal, die fungeren als regionale waterkeringen. De dekken rusten op twee, in het kanaal geplaatste, pijlers die tevens fungeren als machinekamers voor de elektromechanische bewegingswerken en op twee landhoofden, waarvan het westelijke landhoofd ruimte biedt voor de technische installaties. De pijlers vallen op door hun slanke vormgeving met veel schuine vlakken en de manier waarop de bewegingswerken hierin zijn geïntegreerd.

Ontwerp

Na gunning aan de combinatie (D&C-contract) is direct gestart met het ontwerp en de aanvraag van de omgevingsvergunning. Er was hierbij ook geen tijd te verliezen aangezien er in acht weken een definitief ontwerp moest worden gerealiseerd. De meest urgente onderdelen van het uitvoeringsontwerp werden al acht weken later verwacht! Om dit mogelijk te maken, is al in de aanbestedingsfase een serieuze ontwerpinspanning verricht. Zowel het civiele ontwerp (fig. 2), het bewegingswerk (fig. 3) als het VVK zijn door de verschillende ontwerpende



4

partijen met behulp van 3D-software uitgewerkt. Hoewel met verschillende pakketten is gewerkt, bleek het toch mogelijk door middel van universele uitwisselingsbestanden de verschillende modellen te combineren tot één model. Dit resulteerde in een mate van raakvlakkenbeheersing en maatvoeringsvastheid die met alleen 2D-tekeningen vrijwel niet is te halen. De 3D-modellen dienden vervolgens als basis voor de 2D-werktekeningen.

Proeven TU-Delft

Aanvullend op de theoretische beschouwingen zijn ook proeven uitgevoerd naar de toepassing van VVK bij TU Delft. Het zwaartepunt bij de beproevingen lag op het testen van de uittrek- en afschuifweerstand van de boutverbindingen. Tevens zijn de treksterkte van de laminaten en weerstand tegen vermoeiing getest. De benodigde waarden werden ruimschoots behaald. Zodra de val geplaatst en functioneel was, is ter plaatse nog een doorbuigingstest uitgevoerd en een meting gedaan van de eigenfrequentie. Het bepalen van de eigenfrequentie is gedaan om de aanname uit de berekening te controleren en werd uitgevoerd door het laten vallen van een groot gewicht op de brugval en hierbij de trillingen te meten met een accelerometer. Uit het versnellings signaal kon vervolgens de frequentie worden afgeleid. De resultaten hiervan zijn op het moment van verschijnen van het artikel nog niet beschikbaar.

4 Fabricage brugdeel in twee delen met langснаad midden dek

foto: DIC

5 Dwarsdoorsnede brugval en aanzicht stalen balk

bron: DIC

Brugval van composiet

Materiaalkeuze en vormgeving

Omtrent de materiaalkeuze van de brugval heeft de opdrachtgever de vrijheid in de tenderfase gegeven tussen staal of kunststof. Dat de keuze uiteindelijk viel op kunststof heeft te maken met het feit dat deze oplossing niet significant duurder was dan de staalvariant, maar wel aanzienlijke voordelen kende ten aanzien van life cycle cost. Het uitgangspunt voor de brugval is een levensduur van 100 jaar. Het materiaal composiet heeft weinig tot geen onderhoud nodig en was daarom de meest duurzame variant.

Een bijkomend voordeel was het lagere gewicht van VVK ten opzichte van staal. Dit had een positief effect op de capaciteit van de fundering, de benodigde hoeveelheid pijlerwapening en de belasting. Door de lagere belasting had de brug minder ballastgewicht nodig en kon de benodigde capaciteit van het bewegingswerk omlaag.

Het voor de brugval toegepaste VVK bestaat uit glasvezel met vinylesterhars. De thermische uitzettingscoëfficiënt is circa 20% hoger dan van beton en staal. Wat betreft de sterkte is het vergelijkbaar met de betere staalkwaliteiten met een toelaatbare spanning van ruim 400 MPa in de langsrichting van het materiaal. De van tevoren opgelegde constructiehoogte was goed haalbaar. Ook een slankere constructie was met het VVK zeker mogelijk geweest.

Evenals bij de bouwmaterialen beton en staal, is de vormgeving van de doorsnede zo goed als onbeperkt. In het geval van de Nelson Mandelabrug zijn de schampkanten en de middenopstort ook meteen vervaardigd in VVK, zodat de handelingen na het plaatsen beperkt waren tot het aanbrengen van de randelementen en de hiermee geïntegreerde leuning.

Een mogelijk nadeel van het toepassen van een relatief nieuw bouw materiaal is de onbekendheid bij de toetsende partijen. Gelukkig hadden partijen voldoende kennis in huis om inhoudelijke discussies te kunnen voeren en daarbij ook tot overeenstemming te komen.

Uitwerking brugval

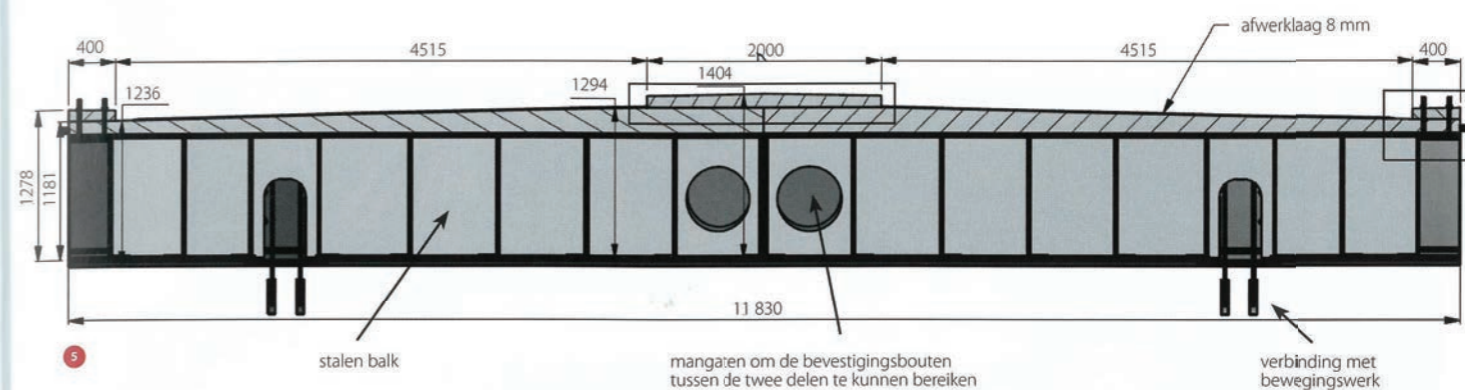
Om de brugval zowel in de fabriek als op locatie te kunnen hanteren, is het dek in twee delen uitgevoerd met een langснаad in het midden van het dek (foto 4). Ter plaatse van de langснаad zijn de twee brughelften op de definitieve locatie door middel van stalen bouten aan elkaar verbonden. Aan de kopse kanten van het dek zijn rechthoekige stalen kokers gesitueerd (fig. 5 en 6). Deze kokers zijn ook weer met bouten aan de twee dekhelften verbonden. Het toepassen van stalen kokers was niet strikt noodzakelijk voor de sterkte van het brugdek, maar is gekozen uit praktisch oogpunt. Het bevestigen van de stalen geleidingsbuizen en balansarmen van het

6 Detail stalen kokerbalk (met mangat) bij aansluiting brugval op aanbrug

bron: DIC

7 Plaatsing brugdeel met één kraan vanaf westelijke aanbrug

foto: R. van der Burgt

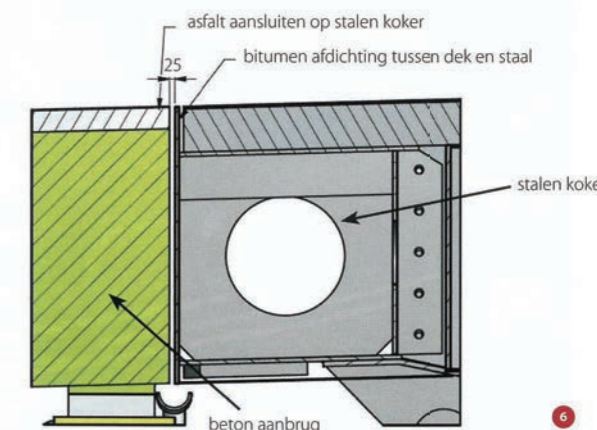


5

bewegingswerk en uitvullen ten behoeve van de definitieve passing is eenvoudig te realiseren met staal. In verband met de levensduur is gekozen voor het aluminiseren van de stalen kokerbalken.

Plaatsing brugval

Doordat de complete brugval uit vier afzonderlijke hoofdcomponenten is opgebouwd, was het mogelijk de val met één kraan vanaf de westelijke aanbrug te plaatsen (foto 7). Als eerste de twee brugdelen en hierna de twee kopbalken. Om het geheel samen te kunnen stellen, is een hulpconstructie gebouwd op beide pijlers. Het dek werd hierdoor tijdelijk ondersteund en



6



7

8 Gewichtsbesparende polystyreen elementen in de aanbruggen
foto: René Pronk, Invenio



8

lag dermate hoog boven de aanbruggen dat de kopbalken konden worden geplaatst. Na het koppelen van alle delen met enkele honderden bouten, is de val circa 250 mm lager geplaatst en gekoppeld met de balansarmen en geleiders van het bewegingswerk. Hierna kon de hulpconstructie worden verwijderd en is de val met behulp van het bewegingswerk afgelaten op zijn opleggingen.

Aanbruggen

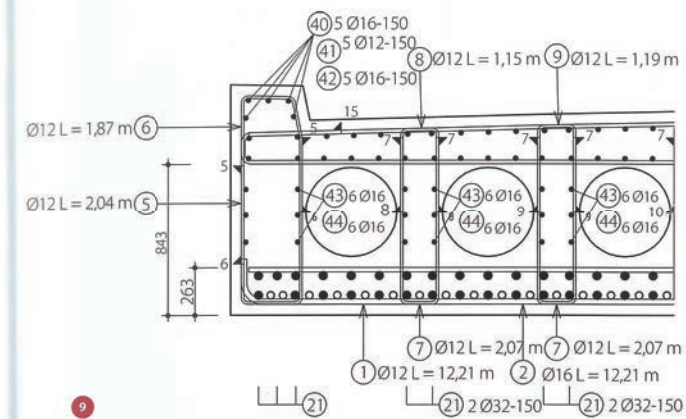
De eerste, voor de hand liggende gedachte was het toepassen van prefab beton voor de realisatie van de aanbruggen. Enkele complicerende factoren hebben echter tot een andere aanpak geleid. Zo was de gevraagde zeeg van 140 mm bij een overspanning van 21 m een onmogelijke opgave voor de geraadpleegde prefab-betonleveranciers. Daarbovenop zorgde het uitwaaiende dek aan de oostzijde, van een kleine 12 m naar circa 14,5 m, voor nog meer hoofdbreken. Bovendien zijn de pijlers aan de bovenzijde onderbroken, zodat er geen doorgaande oplegging aanwezig is. Deze factoren, gecombineerd met de hoge verkeersbelasting hebben uiteindelijk geleid tot de keuze voor in situ beton.

Gewapend beton door gewichtsreductie
Doordat de constructiehoogte van het dek vanuit de vormgeving was opgelegd, was het niet mogelijk hierin te optimaliseren. Het bleek net niet mogelijk de doorsnede zonder voorspanning en dus enkel met traditionele wapening uit te voeren. Dit zou uit plannings- en kostenopgave een voordeel zijn. Door toepassing van gewichtsbesparende 'sparingsbuizen' van polystyreen in het dek, werd de benodigde gewichtsreductie gerealiseerd om toch traditioneel te kunnen wapenen en een conventionele betonsterkteklasse C35/45 toe te passen (foto 8). Om het beton goed te kunnen verdichten rond de polystyreen sparingen en om het probleem van opdrijven van het polystyreen te voorkomen, werd het dek in twee fasen gestort.

De toepassing van de benodigde twee lagen wapening Ø32 aan de onderzijde van de doorsnede (fig. 9) vroeg om speciale maatregelen. Zo was de toepassing van overlappingslassen een probleem in verband met de positionering van de staven ten opzichte van de verticale wapening en de beschikbare tussenruimte voor het beton. De bedachte oplossing met staven uit één stuk (21 m lang) bood door de te lange levertijden helaas geen uitkomst. Uiteindelijk is gekozen voor het aanbrengen van Lenton-koppelingen met het bijbehorende schroefdraad.

9 Deel uit wapeningstekening aanbruggen
bron: SBE

10 Tijdelijke ondersteuning aanbrug met HE1000B-liggers en stempeltorens
foto: P. Bouten



9

Hiermee verviel de noodzaak van overlappen en konden de staven over de volledige lengte van het dek een vaste positie houden. Uiteraard gaan bij de toepassing van koppelingen vermoeiingseisen een grotere rol spelen. Een grondige check wees echter uit dat dit geen onoverkomelijke problemen opleverde, zolang de koppeling maar niet in het midden van de overspanning werd aangebracht.

Uitvoering

De keuze voor in situ beton bracht ook de nodige uitvoeringstechnische uitdagingen met zich mee. Zo moest er een bekisting worden gerealiseerd ter plaatse van een kwetsbare, niet-draagkrachtige ondergrond en dijken die, zoals eerder gemeld, fungeren als regionale waterkeringen. Om deze dijken te ontzien, was in de aanbestedingsfase al gekozen voor een stalen hulpconstructie die overspande van pijlervoet naar landhoofdvlager.

De hoofdconstructie van de ondersteuning bestond uit stalen liggers HE1000B, op een onderlinge afstand van circa 1,2 m tot 1,8 m (foto 10). Hierop bevonden zich de stempeltorens, waarop vervolgens liggers en bekistingsplaat waren bevestigd. Ondanks de forse liggers bleek uit de doorbuigingsberekeningen dat in het midden van de overspanning een doorbuiging van bijna 60 mm zou optreden onder volledige belasting. Daar kwamen nog bij de benodigde extra zeeg ten gevolge van de doorbuiging van het betonnen dek van eveneens 60 mm plus de eindzeeg van 140 mm. Hieruit resteerde een totale benodigde voorinstelling van de bekisting van 260 mm! Zoals verwacht heeft de constructie zich gedragen als voorspeld en resteerde na ontkisten nog zo'n 30 tot 40 mm voor asfalteren, afbouw en tijdsafhankelijke effecten als kruip en relaxatie.

10

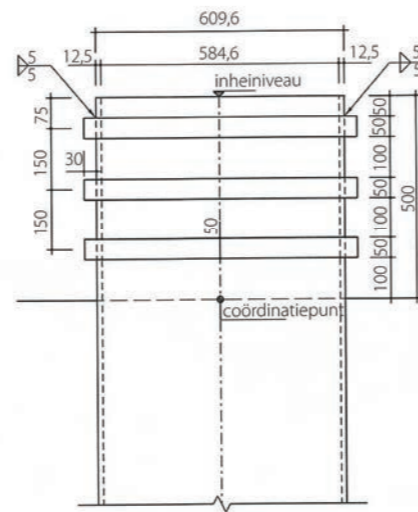


11 Net ontkiste pijlers
foto: P. Bouten
12 Detail blokdeuvels stalen buispaal fundering
bron: SBE



11

13 Doorsnede buispaal remmingwerk
bron: SBE
14 Remmingwerk bestaande uit vier onderling gekoppelde buispalen
foto: R. van der Burgt



12



14

Pijlers

Om de vormgeving van de pijlers met de vele rondingen, sparingen en hellende vlakken het best tot hun recht te laten komen en lelijke stortnaden te vermijden, werd besloten het gedeelte boven de pijlervoet ineens te storten. Voor de bekisting werd geïnvesteerd in een vooraf in de fabriek samengestelde houten bekisting die met chirurgische precisie is vervaardigd en gedetailleerd. Hiertoe is een proefstuk gestort om te bepalen hoe de rondingen het best konden worden uitgevoerd in combinatie met de gekozen mengselsamenstelling. In overleg met de architect is ervoor gekozen de overgang tussen pijler en pijlervoet uit te voeren met een cannelure om een geaccentueerde en strakke lijn te verkrijgen in plaats van een traditionele stortnaad (foto 11).

Fundering

In verband met de aanwezigheid van de kwetsbare waterkeringen was het heien van funderingspalen niet toegestaan. Om eenvoudig te kunnen werken in het water van het kanaal en schoorstanden tot 1:4 mogelijk te maken, is gekozen voor hoogfrequent ingetilde stalen buispalen met een diameter van 610 mm. Voor de momentvaste verbinding van de stalen buispalen in de pijlervoet en landhoofd vloer is gekozen voor een methode met blokdeuvels, hier uitgevoerd als drie stalen ringen rond de kop van de paal (fig. 12). Het voordeel hiervan is dat de nokken zowel (grote) trek- als drukkrachten kunnen overbrengen in het beton en wapening grotendeels overbodig maakt. Door een strakke productieplanning resteerde helaas geen tijd om de blokdeuvels van te voren aan te brengen, maar met behulp van een tent voor een geconditioneerde omgeving en voldoende lassers werd deze klus tijdig op locatie geklaard.

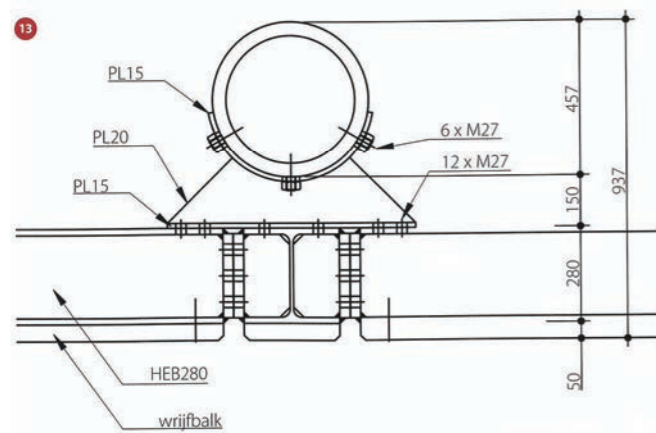
Remmingwerk

Wat betreft het remmingwerk was het nog een uitdaging niet een buitenproportionele constructie te ontwerpen om te kunnen voldoen aan de Eurocode, ROK (Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken) en ERBI (Eisen en Richtlijnen Bouw- en Infra-projecten van de provincie Noord-Holland). Vanuit de opdrachtgever was een doorbuigingseis aan de afzonderlijke buispalen gesteld van 0,5 m, de diepte van het kanaal is ter plaatse van het remmingwerk echter slechts circa 1 m. Er is dus weinig paallengte beschikbaar om deze (elastische) doorbuiging te ontwikkelen. Bovendien waren de voorgeschreven aanvaarbelaasting en -snelheid dusdanig hoog dat een zware buispaal was benodigd om niet te bezwijken. Het nadeel van toepassen van een grotere diameter buispaal is de toenemende stijfheid en daarmee het optredend moment, tezamen met een

beperking van de vervormingscapaciteit en een hogere belasting van de ondergrond. De oplossing is gevonden in een relatief slanke paaldiameter voor een grote vervormingscapaciteit met een grote wanddikte voor de benodigde sterkte. Na uitgebreide studie van de mogelijke en onmogelijke aanvaarhoeken en vaarsnelheden lukte het uiteindelijk met vier – door middel van doorgaande gordingen onderling gekoppelde – buispalen te voldoen aan de eisen (fig. 13 en foto 14). De buispalen zijn met een diameter van 457 mm nog relatief slank, de niet-zichtbare wanddikte bedraagt echter 40 mm!

Tot slot

Binnen een zeer kort tijdsbeslag is de Nelson Mandelabrug gerealiseerd. Het gebruik van een nog niet-ingeburgerd en relatief onbekend materiaal is hierbij geen beperking geweest. Hoewel er zeker een aantal verschillen te noemen is met het bouwen met een traditioneel bouw materiaal, is het werken met composiet in de praktijk niet wezenlijk anders geweest dan bij andere bouwprojecten. Een andere uitdaging binnen het project was het werken in het spanningsgebied tussen de bewegingswerken, architectonische vormgeving, civiele betonbouw en wet- en regelgeving. Geconcludeerd mag worden dat de gemeente Alkmaar er een brug bij heeft waar zowel de bouwers als de stad trots op kunnen zijn. ☒



13

Waterkering en bouwkuip

Omdat te allen tijde een functionele waterkering aanwezig moet zijn aan zowel de west- als de oostzijde van het kanaal, kreeg de in damwand uitgevoerde tijdelijke bouwkuip voor de pijlers een dubbelfunctie als tijdelijke waterkering. De langsgording is aan de buitenzijde van de bouwkuip geplaatst (vaartzijde) en fungeerde daar tevens als geleiding voor de scheepvaart. Door het van toepassing zijn van voorschriften van de TAW¹⁾ (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen) en de STOWA (Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer), werd de damwand iets zwaarder dan enkel voor de bouwkuip nodig zou zijn geweest. Dit had als groot voordeel dat de dijken tijdelijk hun functie verloren en deels konden worden afgegraven om ruimte te bieden aan de ondersteuningsconstructie voor de aanbruggen.

¹⁾ De TAW is in 2005 overgegaan in het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW).

PROJECTGEGEVENS

- project Nelson Mandelabrug
- opdrachtgever Gemeente Alkmaar
- opdrachtnemer Combinatie Beverbrug vof: DIMCO B.V. (voorheen CFE Nederland B.V.) en Demako nv
- vormgeving Joris Smits van Royal HaskoningDHV met ondersteuning van Movares
- toetsing ontwerp Movares
- civiele deel ontwerp SBE (België)
- ontwerp & productie composiet Delft Infra Composites (DIC), onderdeel van Takke Breukelen
- ontwerp & fabricage bewegingswerken Demako, Zwijndrecht (België)
- ontwerp & uitvoering besturing elektrische installaties, verlichting, VRI's Agidens (voorheen Egemin)
- betonleverancier Mebin Alkmaar B.V.
- opening 12 februari 2016